

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Diseño y prototipado de una caja de cambios secuencial



Grado en Ingeniería
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Autor: Íñigo Blanco Toni

Directora: Sara Marcelino Sádaba

Pamplona, 22 de octubre de 2020

AGRADECIMIENTOS

Cuesta creerlo, pero ésta etapa va llegando a su fin. No sé cómo lo he hecho pero si sé gracias a quién, y es que mucha gente ha ido poniendo su granito de arena para que yo llegara hoy a escribir éstas palabras. Y como es de bien nacido ser agradecido, ahí que va!

Lo primero agradecerte tu trabajo, Sara. Hemos vivido tiempos complicados y has tenido paciencia conmigo, adaptándote a lo que necesitaba y preocupándote por la persona que hay detrás del alumno. Te lo agradezco de corazón.

Dicen que para ir rápido hay que caminar sólo, pero si quieres llegar lejos, lo mejor es ir acompañado. Y tienen toda la razón, sin algunos de mis compañeros, probablemente me hubiera quedado por el camino. Gracias Aizpurúa, Bretos, Chavarren, Armañanzas... por haberme empujado, cada uno en vuestro momento y manera hasta llegar hoy aquí. Y no sólo mis compañeros de penurias, otros tomaron otros caminos, pero siguen estando ahí. Lassa, Ekiza, Ana...gracias.

Y no puedo acabar, sin antes agradecer a los verdaderos héroes, a veces medio villanos inintencionados, de ésta historia. Mis padres y mi hermana. Sólo ellos y yo llegaremos a saber cuánto ha costado todo esto. Sin vuestro apoyo no lo hubiera conseguido, así que no me queda otra que poner toda la carne en el asador para devolveros la mitad de lo que me habéis dado.

Y ya para acabar, gracias a toda mi familia, espero que sintáis parte de éste trabajo como vuestro. Éste último año y medio hemos demostrado lo fuertes que somos juntos, estoy muy orgulloso de todos. No puedo evitar acordarme de ti yayo, estoy seguro que hubieras disfrutado como un niño con la impresora.

Por esto y mucho más, ¡gracias a todos!

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Diseño y prototipado de una caja de cambios secuencial



Grado en Ingeniería
en Tecnologías Industriales

Memoria

Autor: Íñigo Blanco Toni

Directora: Sara Marcelino Sádaba

Pamplona, 22 de octubre de 2020

ÍNDICE MEMORIA

1.	INTRODUCCION	3
2.	ESTADO DEL ARTE	4
2.1.	Cajas de cambio manuales	5
2.2.	Cajas de cambio pilotadas o robotizadas	5
2.3.	Cajas de cambio automáticas con convertidor de par	6
2.4.	Cajas de cambio secuenciales	7
3.	ANTECEDENTES	8
3.1.	Learn by doing	8
3.2.	Maquetas	8
3.3.	Impresión 3D	8
4.	OBJETO	9
5.	ALCANCE.....	9
6.	REQUISITOS DE DISEÑO	10
7.	ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS.....	11
8.	DISEÑO	12
8.1.	Relaciones de transmisión	12
8.2.	Disposición de los engranajes y método de engrane.....	14
8.3.	Conjunto eje primario (IBT-01-01-00)	17
8.3.1.	Eje primario (IBT-01-01-01)	17
8.3.2.	Engranajes primarios.....	18
8.3.3.	Separador (IBT-01-01-04), arandelas y anillo de retención (IBT-01-01-10)	18
8.4.	Conjunto eje secundario (IBT-01-02-00)	19
8.4.1.	Eje secundario	19
8.4.2.	Eje del deslizador (IBT-01-02-08)	19
8.4.3.	Rodamientos	20
8.4.4.	Engranajes secundarios.....	21
8.4.5.	Deslizador (IBT-01-02-10).....	21
8.5.	Selección de las marchas.....	23
8.5.1.	Horquillas (IBT-01-03-02)	23
8.5.2.	Tambor selector (IBT-01-06-01)	24
8.5.3.	Estrella (IBT-01-06-02).....	27
8.6.	Acople motor (IBT-01-05-02)	27
8.7.	Soportes de la transmisión (IBT-01-04-01 e IBT-01-04-02).....	28

8.8.	Electrónica.....	29
9.	FABRICACIÓN	32
9.1.	Impresora utilizada.....	32
9.2.	Laminador	33
9.3.	Parámetros de impresión.....	34
9.3.1.	Velocidad.....	34
9.3.2.	Altura de capa	34
9.3.3.	Relleno.....	35
9.3.4.	Número de perímetros.....	35
9.3.5.	Expansión horizontal de agujeros	35
9.4.	Material	36
9.5.	Calibración de los motores.....	36
9.6.	Test de ajustes.....	38
9.6.1.	Test 1	39
9.6.2.	Test 2	41
9.7.	Fabricación de piezas impresas.....	42
9.7.1.	Ejes primario, secundario y del deslizador.....	42
9.7.2.	Engranajes	44
9.7.3.	Barril selector	45
9.7.4.	Horquilla	46
9.7.5.	Piezas generales	48
9.7.6.	Resumen parámetros impresión.....	49
9.8.	Insertos roscados	49
9.9.	Componentes mecánicos no impresos	51
9.10.	Electrónica (conexión motor unipolar como bipolar)	52
10.	PRESUPUESTO	53
10.1.	Realización del proyecto	53
10.2.	Elementos comerciales	53
10.3.	Impresión 3D	53
10.4.	Coste total	54
11.	CONCLUSIONES	55
12.	BIBLIOGRAFÍA	56

1. INTRODUCCION

Si algo tiene en común todo el mundo es que el día a día es un continuo aprendizaje. A veces cosas banales de la vida, otras aspectos técnicos que pueden suponer un reto insalvable dependiendo cómo se afronte. Hoy en día la enseñanza es muy variada, dependiendo del ámbito, la cultura y demás variables. Con el paso del tiempo se han ido desarrollando múltiples metodologías que suenan fuerte como el "*Learning by doing*" o el "*Do it yourself*", que serán los pilares sobre los que se asiente éste proyecto.

Desde la experiencia del autor, metodologías que hagan preguntarse el por qué de las cosas, inciten a la toma de decisiones y den más valor a la práctica siempre van a favorecer el interés y el aprendizaje del alumno, especialmente en ámbitos a veces complejos como la ingeniería.

Se dice que un alumno al día siguiente recuerda el 5% de lo aprendido al día siguiente si sólo ha recibido información escuchando, mientras que asciende al 75% si ha sido mediante prácticas, incluso al 90% si tiene que explicar y argumentar a otras personas lo aprendido. Esto muchas veces no se hace por limitaciones de tiempo, o económicas. Se expone el siguiente ejemplo:

Leonardo Da Vinci inventó el precursor de la caja de cambios. Consistía de una pieza cilíndrica y otra cónica que mediante una serie de engranajes lograba un cambio de velocidades. Desde entonces ha ido evolucionando hasta el punto en que se realiza el cambio de marchas en un coche centenares de veces en un día, y la mayoría de gente no se pregunta qué es, como funciona y por qué está ahí realmente.

Si se tuviera, por ejemplo, una clase de 20 alumnos y 10 cajas de cambios funcionales a escala real, se podría enseñar a 10 de ellos cómo funciona, los mecanismos que la componen, cómo montarla etc, para que posteriormente fueran ellos mismos quien se lo explicaran al resto de sus compañeros. El primer problema sería la inversión necesaria para adquirir 10 cajas de cambios, pero hoy en día, gracias al avance de tecnologías como la fabricación aditiva y el fácil acceso a la información por parte del usuario, cualquiera podría fabricar una caja de cambios si se le dota de los conocimientos necesarios.

A lo largo de éste proyecto se intentará poner solución al ejemplo planteado, documentando el diseño y fabricación de una caja de cambios, para que futuros ingenieros, mecánicos o gente que se pregunte ¿por qué? ó ¿cómo?, puedan aprender haciendo por si mismos.

2. ESTADO DEL ARTE

En prácticamente cualquier vehículo es necesario transmitir el movimiento desde una unidad de potencia (bien sea eléctrica, de combustión, las piernas) hasta las ruedas. Esto se puede realizar de manera directa, o a través de distintos elementos intermedios, como puede ser la caja de cambios.

Pese al auge del motor eléctrico, los motores de combustión interna alternativos (MCIA), siguen siendo los más usados en la mayoría de vehículos hoy en día.

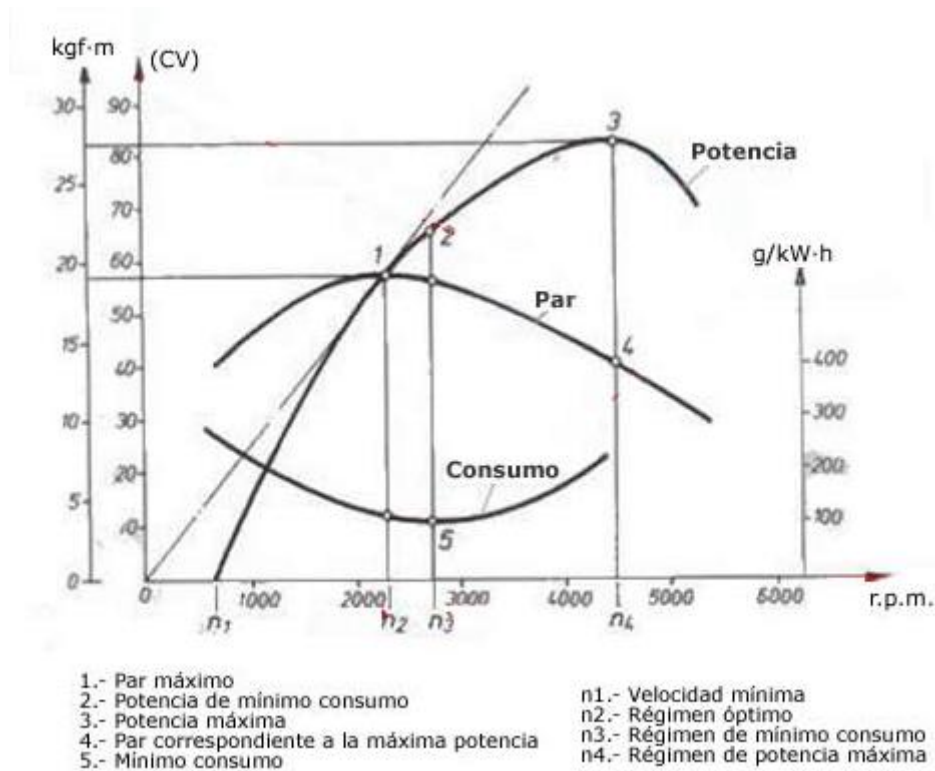


Figura 1. Curva Par-Potencia vs Velocidad de un MCIA

Como puede verse en la *Figura 1*, para cada velocidad a la que gire el motor, se va a producir un par motor, y por lo tanto se transmitirá una potencia, distinta para otra velocidad diferente. De no existir la caja de cambios, las ruedas girarían en un rango de velocidad muy limitado, condicionando el movimiento del vehículo a unas circunstancias específicas. Así pues, la caja de cambios es el elemento encargado de transmitir el par motor necesario a las ruedas, manteniendo la velocidad del motor entre el punto de par máximo y potencia máxima (puntos 2 y 3 de la *Figura 1*).

Existen multitud de configuraciones de cajas de cambio, siendo el funcionamiento similar en todas ellas, variando principalmente el dispositivo que acopla y desacopla el motor de la transmisión.

2.1. Cajas de cambio manuales

Como su propio nombre indica, es el piloto el que debe seleccionar la marcha manualmente mediante la palanca de cambios.



Figura 2. Caja de cambios manual de 3 ejes

Depende del tipo de propulsión que use el coche, pueden ser de dos o tres ejes, siendo lo más habitual que conste de tres. El movimiento se transmite desde el motor al eje primario a través del embrague, haciendo girar el eje intermedio, que a su vez impulsa el eje principal. Éste se encuentra desacoplado hasta que se inserta una marcha mediante el pomo del cambio, el cual, a través de unos selectores, desplazan adelante y atrás los piñones del eje principal, según sea la relación escogida, para ser movidos por la fuerza del eje intermedio.

Al cambiar de marcha, por ejemplo de 1ª a 2ª, el engranaje de 2ª está girando a una velocidad distinta que el de 1ª, por lo que son necesarios unos elementos denominados sincronizadores, encargados de reducir la velocidad relativa de ambos engranajes para suavizar el cambio.

La mayor ventaja de éste tipo de transmisiones es su sencillez, y por lo tanto su económica reparación en comparación con otras, lo que la convierte en una de las más usadas en utilitarios convencionales.

2.2. Cajas de cambio pilotadas o robotizadas

En éste tipo de transmisión, se mantiene la estructura y componentes mecánicos típicos de las cajas manuales tradicionales, pero se incorporan actuadores eléctricos o hidráulicos para accionar elementos como el embrague o los propios cambios. Es un sistema electrónico el que se encarga de cambiar de marcha en el momento adecuado, en base a información recogida por diferentes sensores.

Se trata de una de las automatizaciones más baratas, y puede reducir el consumo del combustible, dependiendo del tipo de conducción del piloto, sin llegar a tener la suavidad de la típica caja automática.

Algunos de los modelos más famosos de cajas de cambios robotizadas son el “DSG” de Volkswagen o el “Tip Tronic” de Audi.

2.3. Cajas de cambio automáticas con convertidor de par

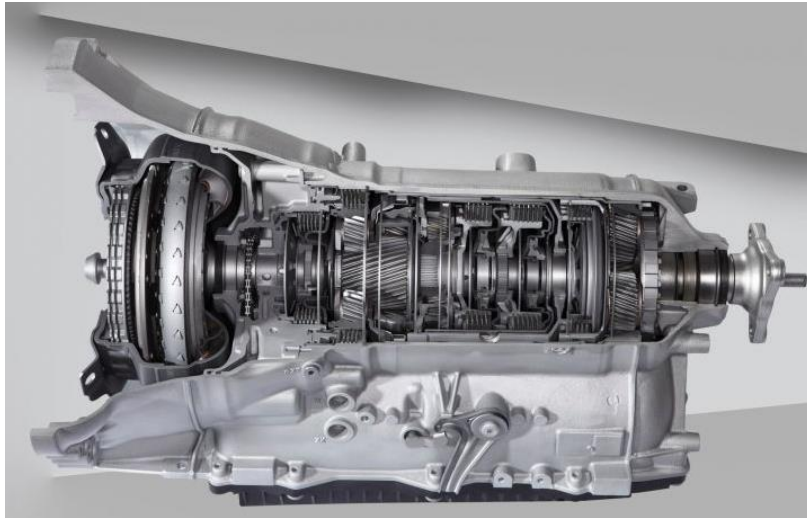


Figura 3. Transmisión automática con convertidor de par

A la salida del motor nos encontramos con el convertidor de par que hace las veces de embrague hidráulico. El funcionamiento es similar al de dos hélices dentro de un recipiente de aceite. La primera de ellas está unida al motor y recibe el nombre de turbina, y la segunda está conectada a los engranajes de la caja de cambio, recibiendo el nombre de bomba. Cuando el motor gira al ralentí la turbina tiene muy poca fuerza y apenas puede mover el aceite. Así, a medida que aumentan las revoluciones del motor aumenta la velocidad de giro de la turbina, creando ésta un “remolino o turbulencia” en el aceite que pone en marcha a la bomba, haciendo girar los engranajes de la caja de cambio.

A continuación, tras el convertidor de par, se encuentra el tren de engranajes epicicloidales o planetarios y la mecatrónica que comanda esos engranajes. Un tren de engranajes epicicloidal está formado por un engranaje central o sol, por tres engranajes que giran en torno al sol y sobre sí mismos, los satélites, y por otro exterior con dientes en su cara interna y que gira sobre los satélites, llamado corona. En este conjunto de engranajes se puede bloquear el giro de los diferentes elementos, dando lugar así a varias combinaciones con diferentes relaciones de transmisión, es decir, con diferentes velocidades de salida.

La principal ventaja de este tipo de cambios automáticos radica en el convertidor de par, ya que este tipo de embrague hidráulico puede transmitir un par mucho mayor que un embrague convencional de disco de fricción, además de que su fiabilidad es muy elevada y teóricamente debería durar toda la vida del vehículo

2.4. Cajas de cambio secuenciales

Como su propio nombre indica, el cambio de marcha se realiza de forma secuencial siendo imposible pasar, por ejemplo, de 3ª a 5ª sin pasar por 4ª.

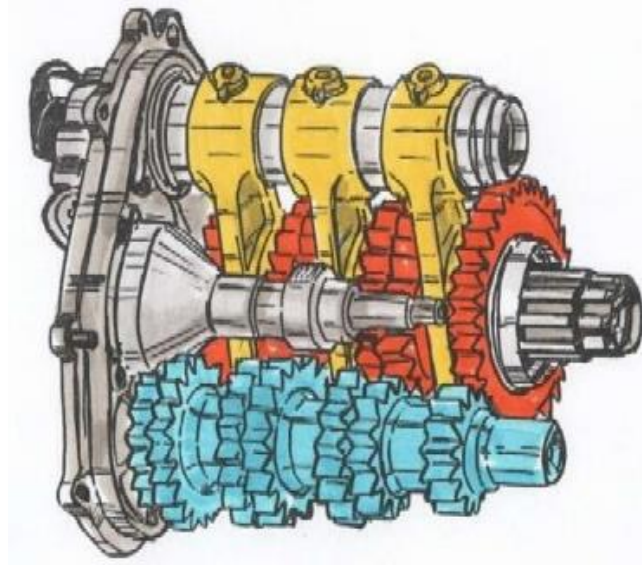


Figura 4. Caja de cambios secuencial de un F1

Es ampliamente utilizada en motos y coches de competición, debido a su rapidez de funcionamiento. Consta de dos ejes, el primario (azul) y secundario (naranja). De forma electrónica mediante levas en el volante, o manual moviendo una palanca hacia abajo o hacia arriba, se gira una pieza denominada tambor selector, que hace desplazarse las horquillas de cambio (piezas amarillas) y selecciona una marcha.

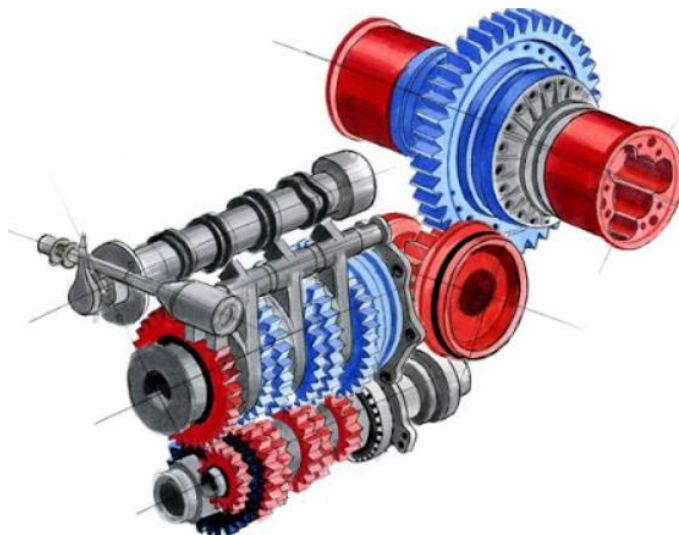


Figura 5. Otro diseño de caja de cambios secuencial

En éste caso el eje primario está representado por las ruedas rojas, y el primario azules. El tambor selector, con unas ranuras, hace las veces de leva cilíndrica, desplazando las horquillas horizontalmente al girar, engranando las marchas.

3. ANTECEDENTES

3.1. Learn by doing

Esta metodología promueve al aprender a base de hacer, de tomar decisiones, acertadas o erróneas. Ejemplos muy conocidos podrían ser marcas como *Lego*, que dispone de una variedad enorme de juguetes y componentes para montar pieza a pieza, con sus manuales de montaje, para diferentes edades y dificultades. Hoy en día son aptitudes valoradas en el mundo profesional, gente resolutiva de acción, que sean capaces de materializar las ideas.

3.2. Maquetas

Hay multitud de productos enfocados en esta filosofía, como los ya mencionados *Lego* o el famoso motor de combustión de Haynes, un kit de construcción de un motor de combustión interna para niños. A demás, en plataformas gratuitas como Thingiverse, donde la gente sube sus proyectos de manera gratuita, se pueden encontrar motores o cajas de cambio para que cada persona las fabrique.



Figura 6. Ejemplo de transmisión manual de Thingiverse

Si bien es cierto que la diversidad de proyectos existentes es grande, no abundan ejemplos técnicos, fieles a la realidad desde un punto de vista ingenieril.

3.3. Impresión 3D

En los últimos años, la impresión 3D se ha acercado mucho al usuario medio, aumentando significativamente la cantidad y calidad de la información. Esto, sumado a la disminución de los precios de material técnico, ha significado que sea uno de los principales recursos utilizados a la hora de materializar proyectos de este tipo.

4. OBJETO

Como se ha visto, la información sobre proyectos para aprender de forma práctica existe, pero desde un punto de vista más lúdico, y no tan orientado a la formación técnica.

Por todo ello, el presente proyecto tiene como objetivo principal el desarrollo de una maqueta de una transmisión secuencial, orientada a la formación de futuros profesionales del sector de automoción o a cualquier persona con interés por la ingeniería, especialmente el público más joven.

Para poder satisfacer dicho objetivo principal se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un análisis de diferentes configuraciones de cajas de cambio.
- Diseñar el sistema en 3D.
- Llevar a cabo la fabricación total del prototipo.
- Verificar el funcionamiento del sistema
- Generar documentación que permita que terceras personas repliquen el proyecto.

5. ALCANCE

El contenido del proyecto abarca desde el estudio de las necesidades que tiene que suplir el proyecto hasta la elaboración de una memoria que describa el proceso de diseño del conjunto, la fabricación mediante impresión 3D, así como la elaboración de planos de fabricación o manuales de montaje. Se verificará el correcto funcionamiento del sistema.

Primero se fijará el número de marchas y las distintas relaciones de transmisión, para posteriormente diseñar el modo de engrane de las mismas. Por último se estudiará cómo dar movimiento al conjunto, así como la posible integración de sistemas que ayuden a la comprensión de la transmisión y su fabricación.

El diseño 3D del conjunto será realizado con ayuda del software SolidWorks y la fabricación por deposición de material fundido con el laminador Ultimaker Cura y la impresora Creality Ender 3 Pro, siempre y cuando sea posible.

6. REQUISITOS DE DISEÑO

Puesto que las variables de diseño son muchas, es necesario acotar en cierta medida el problema. Para ello, se establecen una serie de criterios que se seguirán a lo largo del proyecto.

- Distancia entre ejes no superior a 80 mm.
- Espesor de los engranajes de al menos 12 mm.
- Minimizar el material necesario para la fabricación, adaptando la geometría de las piezas al método de producción, es decir, la impresión 3D.
- Fidelidad a los tipos de transmisiones existentes, en dimensiones y funcionamiento, con el fin de que se pueda extrapolar la información de éste proyecto a una caja de cambios real.
- Adaptar las piezas a diseñar a el volumen de impresión máximo de la impresora, que es de 220x220x225 mm.
- Utilizar mecanismos menos comunes, como pueden ser los usados en transmisiones de competición, ya que la divulgación de éste tipo de aplicaciones es menor.
- Adaptar el diseño teniendo en cuenta que el motor a utilizar es por requisito un motor paso a paso unipolar Nema 17 de 1.2 A.
- Utilización de plásticos sencillos como el PLA en la fabricación, para abaratar costes.

Al ser el objetivo principal que tanto el montaje como el funcionamiento de la caja de cambios sea lo más fiel a la realidad posible, y los esfuerzos mecánicos van a ser ínfimos, al ser un prototipo impreso en 3D para ilustrar el funcionamiento, se dejarán de lado cálculos de resistencia de materiales.

7. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

A la hora de escoger el tipo de transmisión a diseñar y fabricar, se ha realizado un pequeño análisis entre tres tipos de transmisión, explicadas anteriormente:

- Alternativa 1: Caja de cambios manual
- Alternativa 2: Caja de cambios robotizada
- Alternativa 3: Caja de cambios secuencial

Se establecen una serie de criterios, cada uno con su ponderación en función de cuán importante se considere, y una valoración de 1 a 3, siendo 1 el más desfavorable.

CRITERIO	Escala de valoración	
Nº de ejes	3	La transmisión tiene 2 ejes
	2	La transmisión tiene 3 ejes
	1	La transmisión tiene más de 3 ejes
Innovación	3	Apenas existen diseños previos
	2	Diseño inusual pero existente
	1	Hay multitud de diseños similares
Dificultad fabricación	3	10% de piezas no pueden ser impresas
	2	20% de piezas no pueden ser impresas
	1	30% de piezas no pueden ser impresas
Concepto	3	Tecnología innovadora poco utilizada
	2	Introduce conceptos nuevos sin aportar valor
	1	No aporta nada nuevo
Facilidad de montaje	3	No requiere de componentes electrónicos ni programación
	2	Requiere algún componente electrónico
	1	Requiere una programación y electrificación avanzada

Tabla 1. Criterios de decisión

MATRIZ DE DECISIÓN				
PONDERACIÓN	CRITERIOS	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
0,1	Nº de ejes	0,1	2	3
0,2	innovación	1	2	3
0,2	Dificultad de fabricación	2	1	3
0,2	Concepto	1	2	3
0,3	Facilidad de montaje	3	1	2
Valoración final		1,71	1,5	2,7

Tabla 2. Matriz de decisión

Por todo ello, se adaptarán los requisitos de diseño al desarrollo de una **caja de cambios secuencial**.

8. DISEÑO

En cuanto al proceso de diseño de la transmisión, el flujo de trabajo a seguir será el siguiente:

1. Se comenzará por lo más básico, elegir un número de relaciones de transmisión y el valor de éstas, atendiendo a los requisitos impuestos, configurando qué tipo de engranajes se usarán, así como su número de dientes y diferentes parámetros (módulo, ángulo de presión, ancho, etc.)
2. Lo siguiente en la lista será la disposición de los engranajes en los ejes y el método de engrane, para continuar con el diseño del tambor selector que permitirá el cambio de marchas.
3. Por último, se dará movimiento al eje de entrada y al tambor para poder simular el funcionamiento real de la transmisión, integrando todos los elementos en la forma más compacta posible.

A la hora de hacer referencia a piezas, ensamblajes y subconjuntos a lo largo de la memoria y los planos, se ha seguido una nomenclatura propia que se detallará a continuación:

REFERENCIA	IBT-01-04-03	IBT-01-02-00	IBT-01-05-02
<i>Ensamblaje</i>	1	1	1
<i>Subconjunto</i>	4	2	5
<i>Pieza</i>	3	0	2

Tabla 3. Codificación piezas y planos

Cada componente irá codificado con IBT-*nº de ensamblaje-nº de subconjunto-nº de pieza*, así que el ensamblaje general será el IBT-01-00-00 y el resto de piezas irán computando como en la tabla.

8.1. Relaciones de transmisión

Puesto que en éste tipo de cambios secuenciales prima la eficiencia y velocidad en el cambio, aspectos negativos como el ruido quedan en un segundo plano, haciendo que, por su sencillez, fiabilidad y extendido uso, se haya optado por que sean engranajes rectos los utilizados en ésta transmisión.

Una de las exigencias derivadas del uso de engranajes rectos es que sólo es posible transmitir potencia entre ejes paralelos, por lo que la distancia entre ejes para cada par de engranajes deberá ser constante y menor de 80 mm.

$$d_{\text{ejes}} = \frac{m(Z_1 + Z_2)}{2} < 80 \text{ mm}$$

Ecuación 1. Distancia entre ejes engranajes rectos

Siendo:

m: Módulo [mm] de ambos engranajes

Z₁ y Z₂: Número de dientes de cada una de las dos ruedas dentadas por cada par de engrane

Puesto que las fuerzas sobre los dientes van a ser bajas, debido al bajo par de entrada, no es necesario un módulo muy grande. Aun y así, las ruedas tienen que tener un diámetro suficientemente grande como para que haya sitio dónde ubicar los tetones que permitirán el

engrane entre marchas, tras colocar los rodamientos, como se explicará más adelante. Es por esto que módulos pequeños darían problemas, puesto que producirían una rueda con un diámetro primitivo demasiado pequeño.

Como primer diseño, se fijan el módulo (m), el ángulo de presión (β) y el espesor (b) de todas las ruedas dentadas en los siguientes valores:

m	3 mm
β	20 °
b	12 mm

Tabla 4. Parámetros iniciales de todos los engranajes

Todos ellos valores normalizados muy utilizados en multitud de diversas aplicaciones.

Una vez predefinido un módulo, ya se puede despejar de la *Ecuación 1* cuanto deben sumar los dientes de cada pareja de engranajes, por lo que:

$$Z_1 + Z_2 < 53.33$$

Se obtiene que la primera condición a cumplir será que, para cada relación de cambio, la suma del número de dientes del engranaje de entrada y de salida sea 53. Al tener dos incógnitas, se necesita una segunda condición, que serán unas relaciones de transmisión objetivo.

Puesto que el objetivo principal es ilustrar el funcionamiento de una transmisión, se buscarán relaciones que generen una velocidad del eje secundario tanto menor como mayor que el eje primario.

$$i = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{w_2}{w_1}$$

Ecuación 2. Relación de transmisión

Siendo:

Z_1 y w_1 : Número de dientes y velocidad angular engranaje de entrada

Z_2 y w_2 : Número de dientes y velocidad angular engranaje de salida

Se buscarán un total de 6 marchas, comenzando con una reducción de velocidad de 0.5, es decir, el eje secundario girará a la mitad de velocidad que el primario, y se aumentará 0.15 cada relación hasta llegar a 1.25 en sexta marcha.

Marcha	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª
i	0.5	0.65	0.8	0.95	1.1	1.25

Tabla 5. Relaciones de transmisión objetivo

Puesto que cada relación depende de Z_1 y Z_2 , se obtiene un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas para cada marcha, pudiendo calcularse el número de dientes que tendrán cada una de las ruedas dentadas de la transmisión. Cabe destacar que, puesto que tienen que ser números enteros, las relaciones de transmisión finales diferirán de las establecidas en la *Tabla 2*, quedando de la siguiente manera:

Marcha	Z_1	Z_2	i
1ª	18	35	0,51
2ª	21	32	0,66
3ª	23	30	0,77
4ª	26	27	0,96
5ª	28	25	1,12
6ª	29	24	1,21

Tabla 6. Número de dientes y relaciones finales

La distancia entre ambos ejes, una vez fijados el módulo y el número de dientes quedará:

$$d_{\text{ejes}} = \frac{3 * 53}{2} = 79.5 \text{ mm}$$

8.2. Disposición de los engranajes y método de engrane

Una vez elegido el número de marchas, sabemos que necesitamos disponer de 6 pares de engranajes. Es decir, el eje primario (entrada de par) constará de 6 ruedas dentadas montadas sobre él, y el secundario (salida de par) de otras 6. Hay diferentes combinaciones a la hora de distribuir los engranajes pero siempre se debe cumplir lo siguiente:

- Cuando una marcha esté engranada, las dos ruedas correspondientes a esa marcha deben girar solidarias a ambos ejes, si no, no hay transmisión del movimiento.
- En el resto de pares de engranajes que no corresponden a la marcha engranada, al menos una de las ruedas dentadas debe girar loca, si no estaríamos introduciendo dos relaciones de transmisión distintas en un mismo eje, lo que supondría hacerlo girar a dos velocidades diferentes al mismo tiempo, algo físicamente imposible, suponiendo el bloqueo de la transmisión.
- En punto muerto, o neutral, todos los pares de engranajes deben tener una rueda dentada girando loca, pues no debe haber transmisión de movimiento al eje de salida.

Teniendo todo esto en cuenta la solución más sencilla parece ser que un eje tenga todas las ruedas dentadas girando solidariamente a él, y en el otro eje, todas giren locas, existiendo un mecanismo que permita bloquear la rueda de la marcha engranada al eje cuando sea necesario. Por simplicidad, se distribuirán las 6 ruedas del eje primario solidarias a éste, y las otras 6 ruedas del eje secundario, girando locas.

A continuación se muestra un ejemplo real, de una caja de cambios de 5 velocidades de la marca japonesa Toyota, la cual sigue el mismo principio que el elegido en éste proyecto:

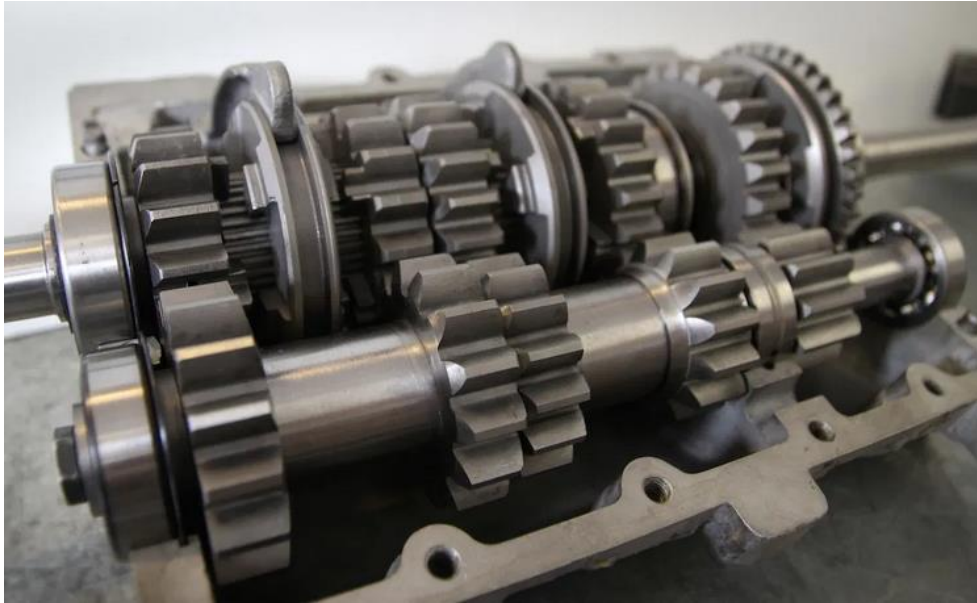


Figura 7. Caja de cambios Toyota T50

El eje de la parte inferior es el más sencillo, puesto que tiene las 5 ruedas dentadas, que giran solidarias a él. Éste eje es el primario, el que a través del embrague, transmite el movimiento desde el motor. El eje superior es el secundario, encargado de transmitir la potencia al diferencial y hacia las ruedas a una velocidad en función de la marcha. Consta de 5 ruedas dentadas que giran locas, con unas pestañas o tetones, y unos anillos solidarios al eje con los mismos tetones entre cada par de marchas. Cuando una marcha se engrana, el anillo se desliza hacia un lado, de manera que los tetones del anillo y del eje se acoplan y el engranaje ya no puede girar loco, y arrastra al eje a través del anillo. De ésta manera se cumplen los requisitos descritos anteriormente, siempre hay un engranaje girando solidario al eje primario, y los engranajes del eje secundario giran locos, menos cuando se engrana una marcha, ya que uno hará girar al eje a su misma velocidad, mientras que los otros seguirán girando de manera independiente, cada uno a su relación de transmisión correspondiente.

Éste sistema, conocido en inglés como *“Dog Ring Gearbox”*, se utiliza en todas las cajas de cambios secuenciales, ya sean en motocicletas o en coches deportivos, especialmente en competición, debido a su sencillez y velocidad de cambio. Basta con mover el anillo, o deslizador, unos milímetros para realizar el cambio.

Una vez descrito el tipo cambio, se debe elegir la distribución de los engranajes a lo largo de los ejes. Puesto que trabajamos con una transmisión de 6 velocidades, necesitaremos 3 deslizadores, cada uno de ellos engranará dos marchas.

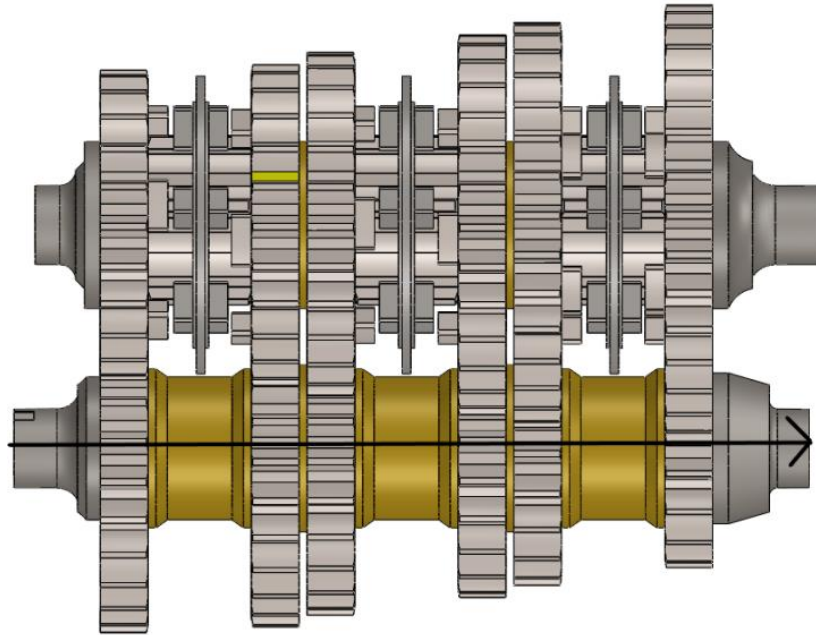


Figura 8. Transmisión en neutral

Como puede verse en la figura anterior, se ha optado por ordenar los engranajes por tamaño. Así resulta muy sencillo identificar visualmente qué marcha está engranada en cada caso. El eje inferior es el primario, el cual lleva todos sus engranajes solidarios, siendo el más pequeño el engranaje de 1ª. En el secundario, las ruedas dentadas girarán locas y tres deslizadores serán los encargados de “fijar” cada engranaje al eje en cada marcha. Cada deslizador engrana dos marchas consecutivas distintas. A continuación se puede ver el engrane de una marcha.

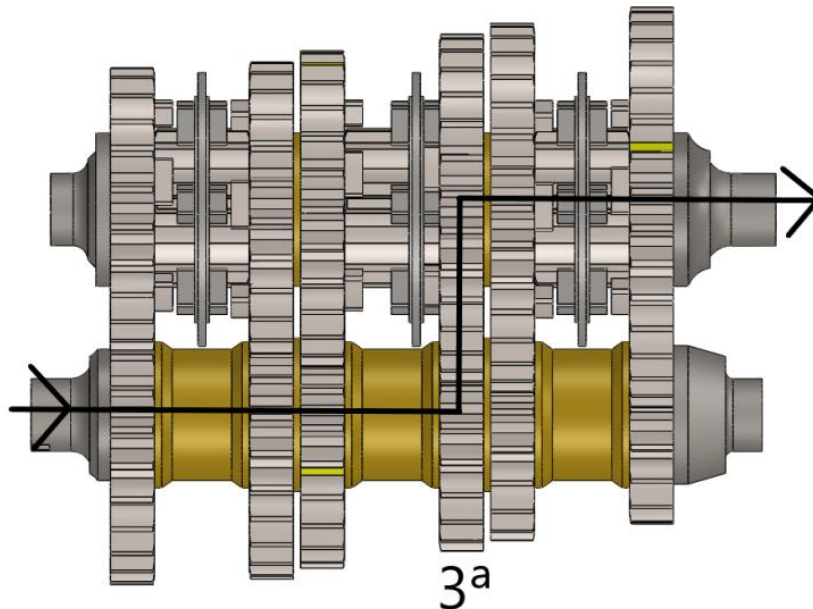


Figura 9. Engrane de la 3ª marcha

Si el deslizador central se desplaza hacia la derecha, el engranaje de 3ª girará solidario al eje de salida, y se transmitirá el movimiento hacia las ruedas. El resto de engranajes giran locos.

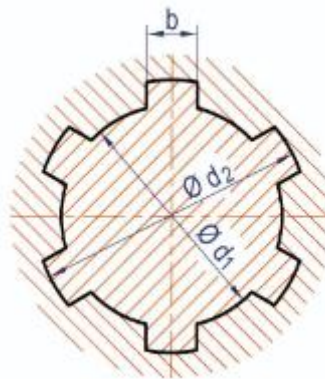
8.3. Conjunto eje primario (IBT-01-01-00)

Debido a la configuración de la transmisión elegida, las piezas montadas sobre el eje primario destacan por su sencillez. Los engranajes deberán ir solidarios al eje, separados a una cierta distancia, y todo el conjunto se compacta y fija con un anillo de retención.

8.3.1. Eje primario (IBT-01-01-01)

Hay diferentes formas de transmitir potencia a través de un eje, como por ejemplo chavetas y acanaladuras. En éste caso, al tener que ir todos los engranajes solidarios al eje, lo más sencillo es utilizar un eje nervado en toda su longitud. Típicamente se suele mecanizar con el engranaje de 1ª (el más pequeño), pero por facilitar la fabricación y posibilitar el cambio de las relaciones de transmisión sin tener que reimprimir el eje, se optará porque todos los engranajes sean independientes al eje.

Hay diferentes ejes nervados. En función de la carga y velocidad de trabajo, se elige el más adecuado. En éste caso se opta por un eje nervado de flancos rectos, utilizado en aplicaciones de alto par y baja velocidad. En contraposición a los ranurados con flancos de envolvente, su modelado CAD es más sencillo, y el funcionamiento de la transmisión no va a variar.



ISO14-nº de nervios x d1 x d2

Como en éste proyecto las cargas van a ser muy bajas, se tiene cierta libertad para elegir las dimensiones de algunas piezas. Se escoge una medida de eje lo más próxima a una caja de cambios real, completamente funcional, que asegure unas dimensiones finales del prototipo similares a las reales, y que permita el montaje del engranaje más pequeño (M3 18T), ya que de ser el eje muy grande, el agujero del engranaje podría llegar a ser más grande que el propio engranaje. La dimensión elegida según la norma ISO14 es la siguiente:

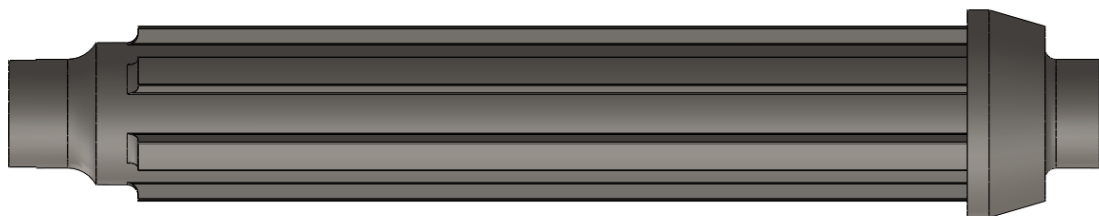


Figura 10. Eje nervado primario ISO14-6x26x32

8.3.2. Engranajes primarios

Las ruedas dentadas del eje primario deben de girar solidarias a su eje, por lo que simplemente serán engranajes normalizados del tamaño elegido en el apartado 8.1, con un agujero ISO14-6x26x32. Una de las caras será completamente plana y se utilizará como cara sobre la que imprimir la pieza y ahorrar material de soporte, como se verá mas adelante. En la otra cara se realiza con corte de 2 mm para ahorrar material, como puede verse a continuación:

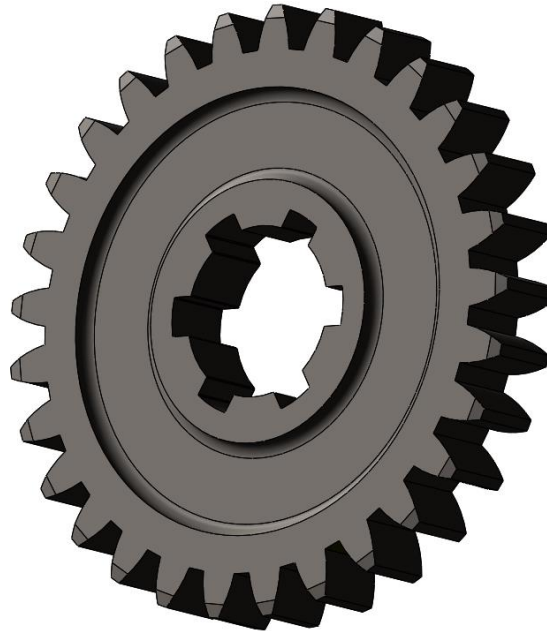


Figura 11. Diseño engranajes primarios

8.3.3. Separador (IBT-01-01-04), arandelas y anillo de retención (IBT-01-01-10)

Una vez conocida la dimensión del eje, el resto de piezas son inmediatas. Los separadores mantienen los engranajes a la distancia correcta y tienen un diámetro interno de 32 mm, igual al exterior del eje. De la misma manera, las arandelas deben tener un diámetro interno de 32 mm y se ha escogido un espesor de 2 mm. El anillo de retención compacta todas las piezas del eje, evitando que se salgan.

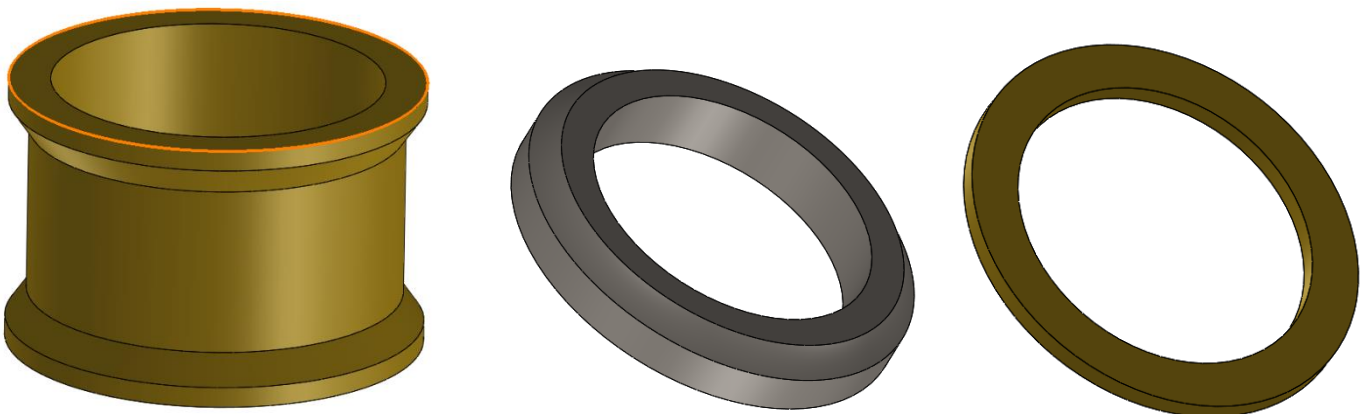


Figura 12. De izquierda a derecha: Separador, anillo de retención y arandela

8.4. Conjunto eje secundario (IBT-01-02-00)

La complejidad del conjunto de piezas que conforman el eje secundario es algo mayor debido a su mayor número de piezas y a la necesidad de que los engranajes giren locos o solidarios al eje, en función de la marcha engranada.

8.4.1. Eje secundario

Al igual que el eje primario, el secundario debe transmitir el movimiento cuando una marcha está engranada, por lo que se utilizará el mismo eje nervado de flancos rectos, el ISO14-6x26x32 para aprovechar los mismos ajustes (se estudiará en el apartado *fabricación*) y ahorrar tiempo.



Figura 13. Eje nervado secundario ISO14-6x26x32

8.4.2. Eje del deslizador (IBT-01-02-08)

Se trata de una de las piezas que dota al sistema de la capacidad de que los engranajes giren independientes al eje o solidarios a él.



Figura 14. Eje del deslizador de una caja de cambios de un F1

En la figura anterior se muestra el diseño de ésta pieza en una caja de cambios de un Formula 1. Prácticamente en la totalidad de éste tipo de transmisiones, el funcionamiento de ésta es el mismo por lo que se aplicará a la transmisión de éste proyecto. Se observa cómo la pieza tiene dos tipos de nervios, los del agujero interior y los exteriores. Los interiores van sobre el eje secundario, y hacen que ambas piezas giren solidarias, y el exterior sirve de guía del deslizador, haciendo que el conjunto eje secundario/eje del deslizador/deslizador giren siempre a la misma velocidad. Sobre la parte cilíndrica asientan los rodamientos, girando libremente.

En éste caso, dada la distribución elegida, se tiene un engranaje a cada lado. Es decir, cada eje del deslizador debe controlar dos marchas, por lo que se necesitarán dos partes cilíndricas

sobre donde giren cada uno de los rodamientos de las dos marchas, es decir la pieza será simétrica, como puede verse a continuación:

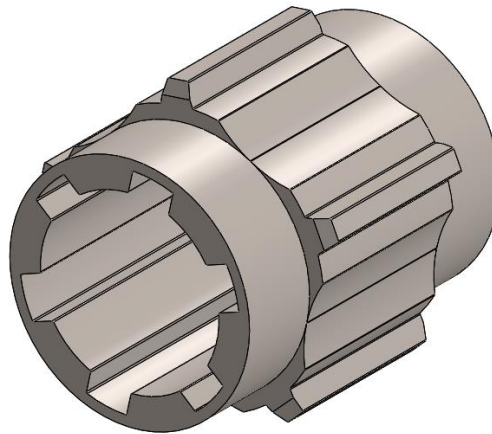
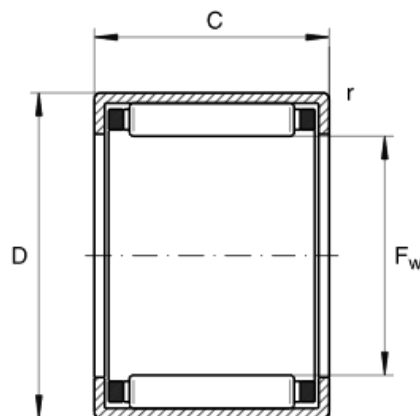


Figura 15. Eje del deslizador utilizado

8.4.3. Rodamientos

Los engranajes deben girar libremente sobre el eje del deslizador, por lo que es necesario implementar un rodamiento. Al trabajar con engranajes rectos, sólo existen cargas radiales y tangenciales, por lo que no es necesario utilizar rodamientos de bolas y bastará con utilizar de agujas, pese a que no absorban carga radial, ya que es inexistente.

Al estar trabajando con dimensiones lo más realistas posibles y cargas muy bajas, implica que no se van a elegir rodamientos en función de una capacidad de carga y un número de ciclos, sino que se elegirá un rodamiento que por geometría y disponibilidad, encaje bien en el conjunto. En éste caso se opta por un rodamiento del mismo espesor que el ancho del engranaje y con un diámetro exterior no muy grande, puesto que debe ir montado dentro del engranaje secundario más pequeño, que es de 24 dientes, y seguir habiendo espacio para los tetones. El rodamiento elegido es el HK-3512 de la casa SKF.



Donde para el rodamiento seleccionado,

$$F_w = 35 \text{ mm}$$

$$D = 42 \text{ mm}$$

$$C = 12 \text{ mm}$$

8.4.4. Engranajes secundarios

Las ruedas dentadas del eje secundario deben girar libremente, por lo que tendrán un agujero del tamaño del diámetro exterior del rodamiento, y unos tetones que engranen con el deslizador cuando se introduzca una marcha. Para ahorrar peso, se realizan dos diseños, uno para engranajes más grandes y otro para los más pequeños.

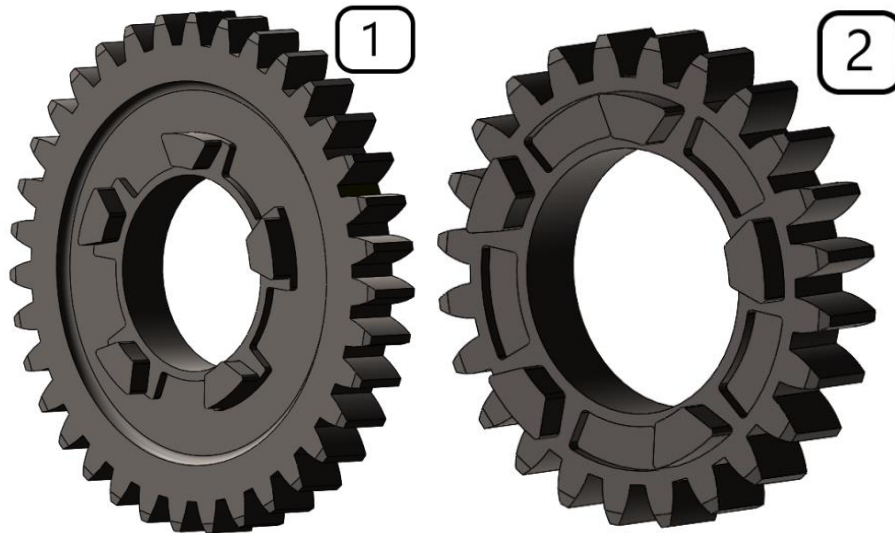


Figura 16. Diseños engranajes secundarios

Tanto el agujero interno como el diseño de los tetones es el mismo para todos los engranajes, pero al existir una gran diferencia de tamaño entre el engranaje más pequeño (24T) y el más grande (35T), la optimización del material es distinta para cada uno. El primer diseño es aplicado a las marchas 1ª, 2ª y 3ª. El segundo diseño al resto, es decir a 4ª, 5ª y 6ª. Al igual que los engranajes del eje primario, la cara plana se utilizará como superficie de impresión para evitar el uso de material de soporte durante la fabricación.

8.4.5. Deslizador (IBT-01-02-10)

En éste punto, se tiene una pieza (eje del deslizador) girando solidaria al eje, y todos los engranajes girando locos de la siguiente manera:

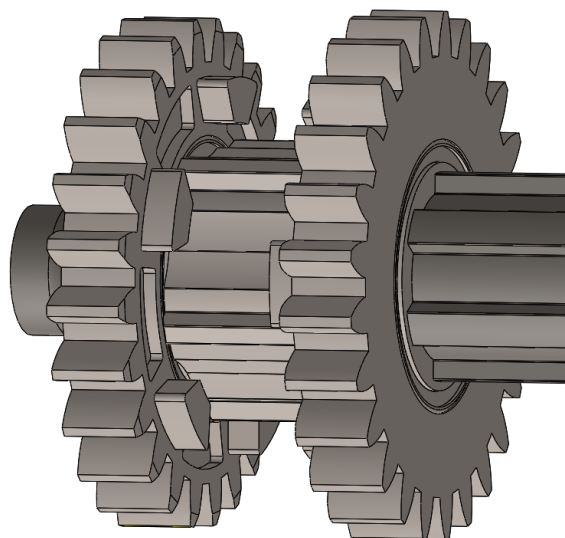


Figura 17. Situación sin transmisión de movimiento

Por mucho que giren los engranajes y el eje del deslizador esté unido al eje secundario, no hay movimiento hacia las ruedas. Es por ello que es necesario diseñar una pieza que conecte un engranaje al eje del deslizador y por lo tanto transmita el movimiento hacia el eje. Ésta pieza es el deslizador.

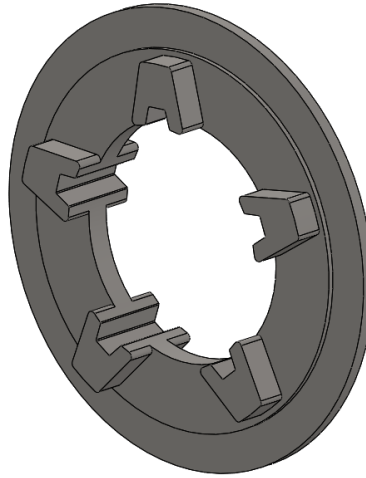


Figura 18. Deslizador

El agujero ranurado interno tiene la misma dimensión que el externo de su eje, por lo que girará solidario a el y por lo tanto al eje secundario, pero tiene un grado de libertad, deslizando sobre el eje de derecha a izquierda.

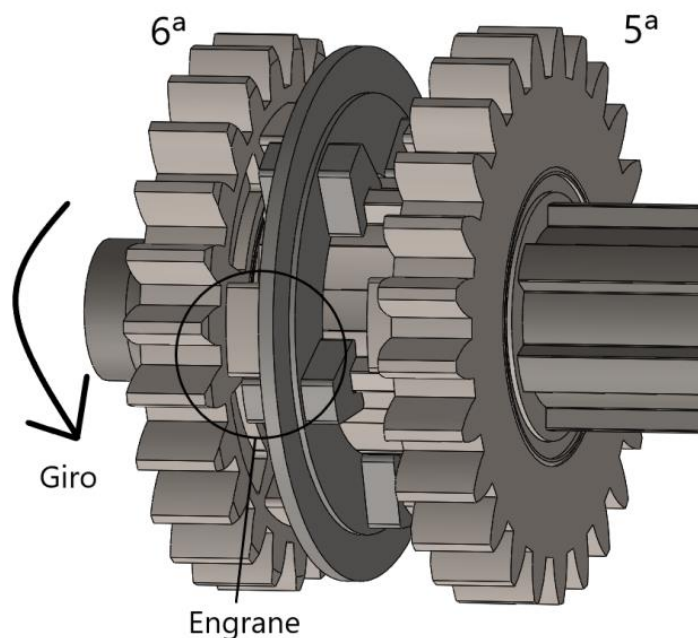


Figura 19. Engrane 6ª marcha

En el momento en el que el deslizador se desplace lateralmente, los tetones entrarán en contacto con los del engranaje y el movimiento se transmitirá. Al haber 6 marchas y cada deslizador engranar un par de marchas, se necesitarán 3 deslizadores.

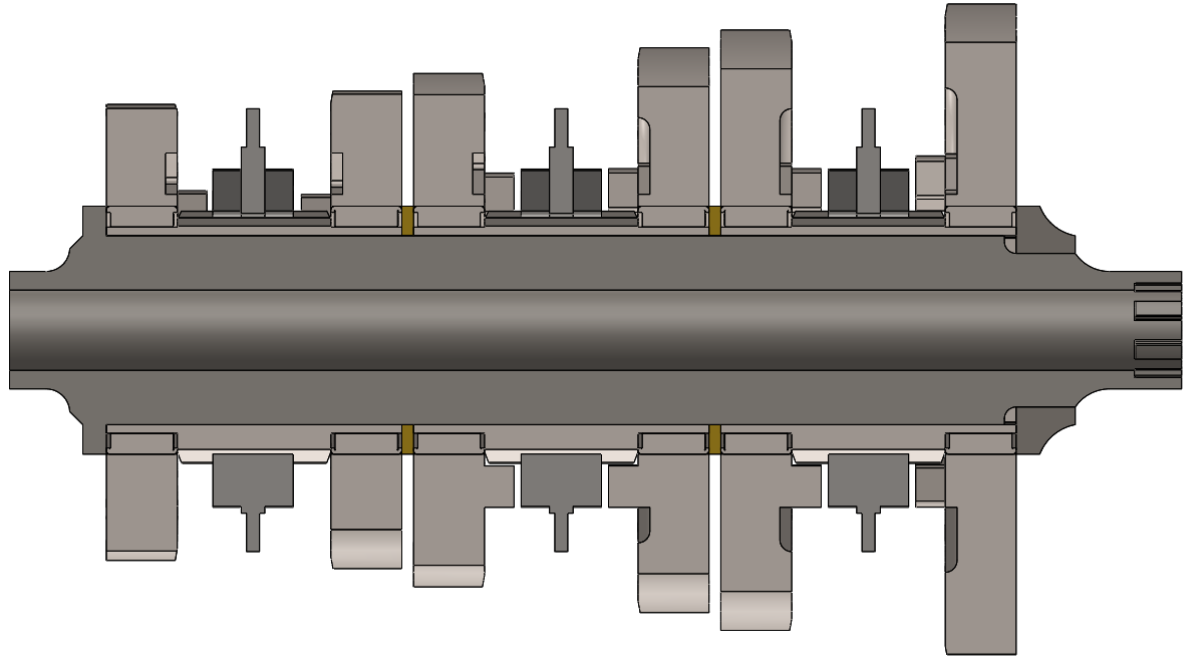


Figura 20. Sección conjunto eje secundario

Una vez diseñado el engrane, se repite tres veces para completar el eje. Al igual que en el primario, dos arandelas separan los engranajes para reducir la superficie de contacto entre piezas, ya que cada engranaje estará girando a una velocidad diferente. Un anillo de retención (IBT-01-02-09) compacta el conjunto para evitar que se muevan las piezas. El eje secundario tiene un agujero ranurado ISO14-6x13x16 para acoplar cualquier elemento que ayude a la visualización de la velocidad del eje secundario durante el funcionamiento del sistema.

8.5. Selección de las marchas

Hasta el momento, se ha definido que el engrane de las marchas debe hacerse desplazando el deslizador de un lado a otro en función de la marcha a engranar, pero no se ha definido qué piezas van a realizar ese desplazamiento ni cómo va a hacerse. Aquí es donde entran en juego las horquillas y el tambor selector.

8.5.1. Horquillas (IBT-01-03-02)

La horquilla es la pieza encargada de, al desplazarse, arrastrar con ella al deslizador hasta el punto necesario para que se produzca el engrane.

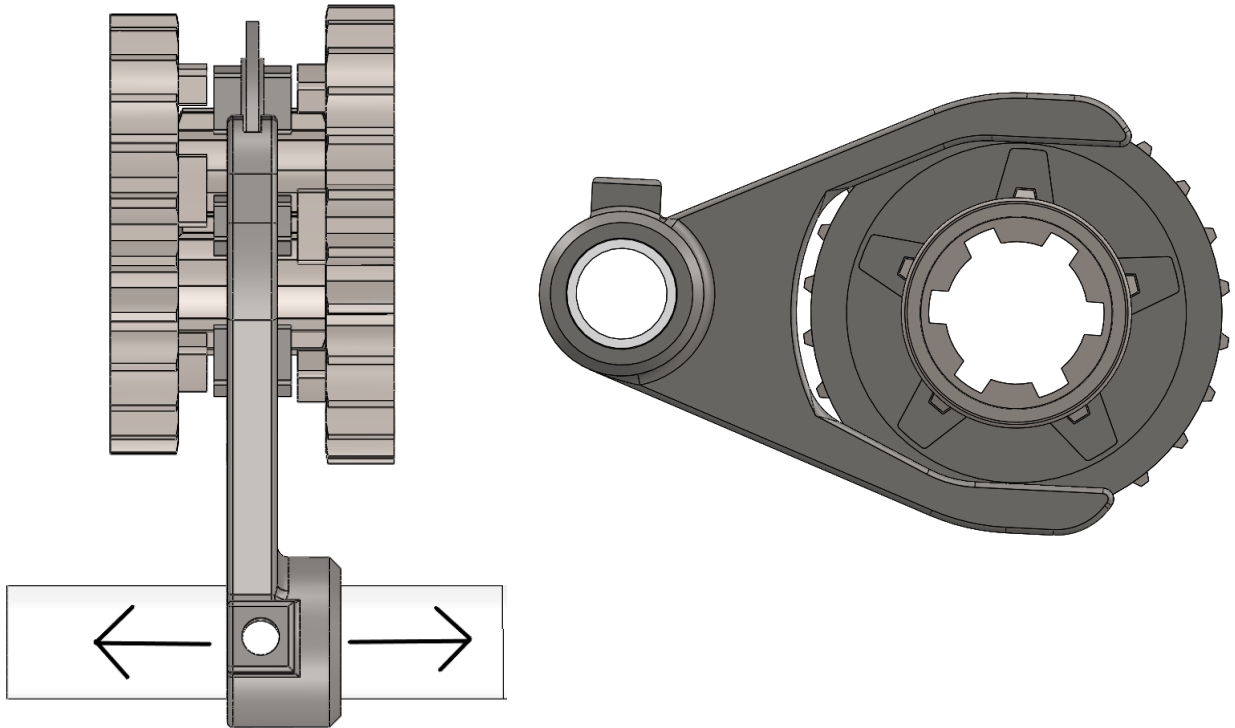


Figura 21. Funcionamiento horquilla

Ésta se desplaza sobre un tubo de PVC (IBT-01-03-01) y a su vez desplaza al deslizador. Las dimensiones de los brazos (sobre todo espesor de brazos etc) van a ir determinadas por el comportamiento del sistema durante el funcionamiento, en función de la rigidez mostrada tras la fabricación. Las medidas finales que garantizan el correcto funcionamiento de ésta y cada una de las piezas deberá consultarse en el *Anexo Planos*.

8.5.2. Tambor selector (IBT-01-06-01)

Una vez definido el uso de la horquilla, se tiene la siguiente situación:

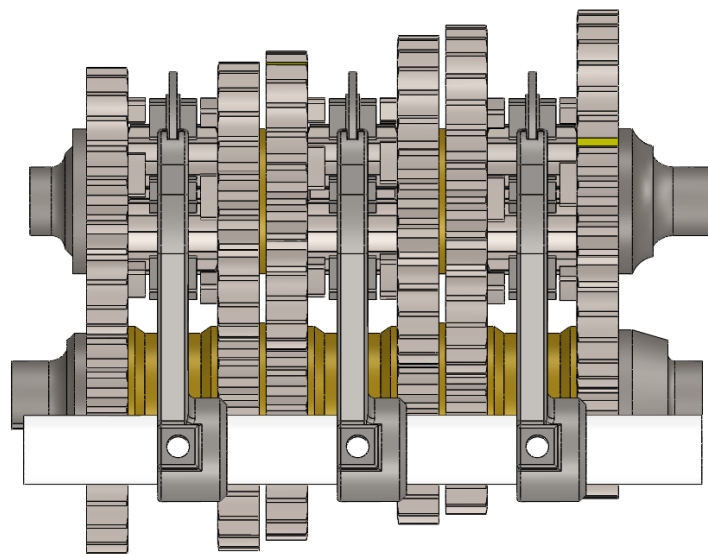


Figura 22. Conjunto tras el diseño de horquillas

La transmisión ya es capaz de funcionar en sus dos modos, en neutral, o con una marcha engranada, gracias al desplazamiento de las horquillas que mueven el deslizador. Sin embargo, se necesita una pieza que dote de ese movimiento a las horquillas. Esto se puede realizar de diferentes formas y suele depender del tipo de transmisión. En el caso de las cajas de cambios secuenciales se hace a través del tambor selector.



Figura 23. Tambor selector de una caja de cambios de F1

El tambor o barril selector es una pieza que hace las veces de leva cilíndrica, transformando un movimiento circular en una traslación del seguidor, en éste caso la horquilla. El giro se puede hacer accionando hacia arriba o hacia abajo el pedal del cambio en una motocicleta o con un accionamiento electrónico como en la F1.

En éste caso, el tambor debe ir engranando las marchas consecutivamente desde neutral (N) hasta 6ª cuando gire en un sentido, y descender desde 6ª hasta N al invertir el giro. Como se tienen 3 horquillas (cada horquilla engrana dos marchas), bastará con diseñar el movimiento de una y repetirlo dos veces con un desfase, como se va a ver a continuación:

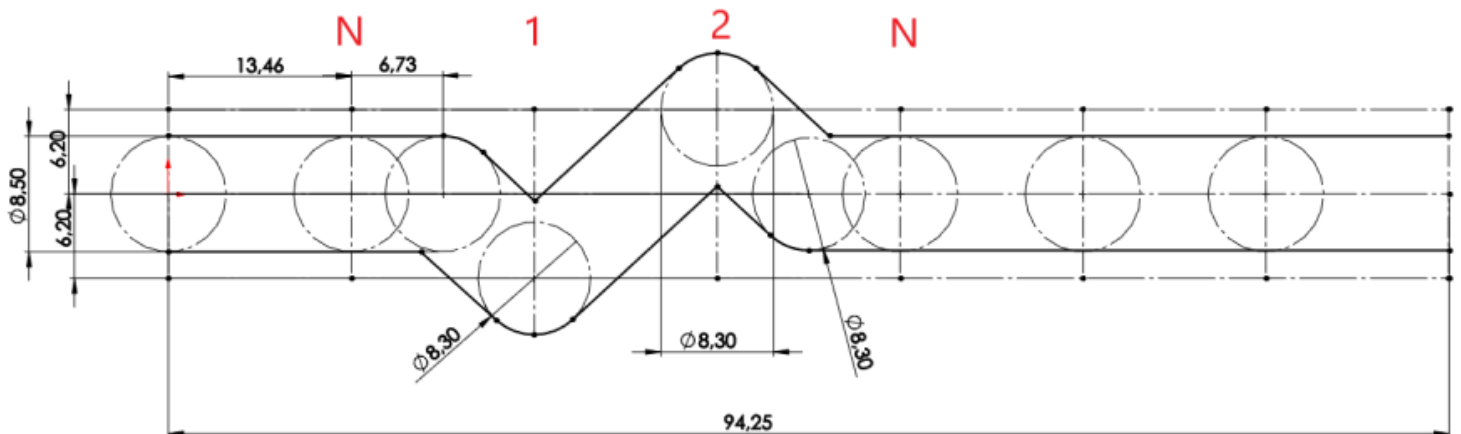


Figura 24. Esquema desplazamiento del seguidor de una horquilla

El esquema anterior es el desplazamiento lineal que tiene que seguir el seguidor de una sola horquilla, en éste caso la que gobierna el cambio de 1ª y 2ª. La longitud del recorrido es $\pi \cdot D$, siendo D el diámetro del cilindro del tambor. Esto es así porque en una vuelta del tambor se tiene que pasar por todas las posiciones posibles. La secuencia tiene 7 valores (N,1,2,3,4,5,6) por lo que se divide el desplazamiento en 7 tramos de longitud $\pi \cdot D / 7$. Cada uno de esos tramos (líneas discontinuas verticales) dictaminará la posición del seguidor en cada marcha. Las

circunferencias en línea discontinua representan la cabeza del tornillo que hará las veces de seguidor de la leva, que irá atornillado a la horquilla.

Si envolvemos el croquis sobre un cilindro de diámetro 30 mm obtendremos lo siguiente. En el primer tramo, el seguidor no se moverá puesto que las caras de la leva son paralelas. Al entrar al segundo tramo, las caras de la leva se curvan y el seguidor se desplazará 6.2 mm hacia un lado, que es la distancia que se quiere desplazar la horquilla para engranar 1ª. Si se continúa con el giro del tambor, el seguidor se desplaza 12.4 mm hacia el lado opuesto, engranando 2ª para en el cuarto tramo volver a su posición neutral. Es decir, girando el tambor en un mismo sentido, la primera horquilla realizará la secuencia N-1-2-N-N-N-N. Si se traslada y rota éste esquema 3 veces, se completará toda la secuencia:

	N	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª
0°	-	X	X	-	-	-	-
2*360/7	-	-	-	X	X	-	-
4*360/7	-	-	-	-	-	X	X

Como puede verse en la tabla, la 3ª debe engranarse cuando la 2ª se desengrana, por lo que hay una diferencia de dos posiciones entre la selección de 1ª y 3ª y 4 posiciones entre 1ª y 5ª. Como cada posición son $360/7^\circ$, si se copia el mismo esquema girándolo 102.86° y 205.71° , para una giro completo del tambor se habrán seleccionado las 6 marchas.

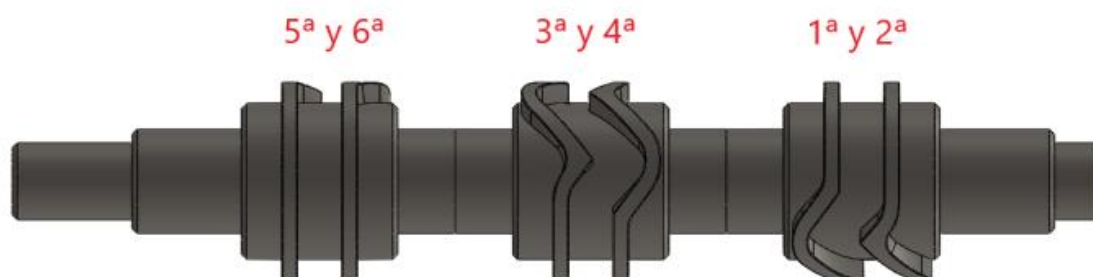


Figura 25. Diseño del tambor selector

Para evitar que si por error se da más de una vuelta se pase de 6ª a 1ª o de neutral a 6ª, se añade un tope para que al llegar a 6ª el seguidor de la horquilla no pueda seguir avanzando:

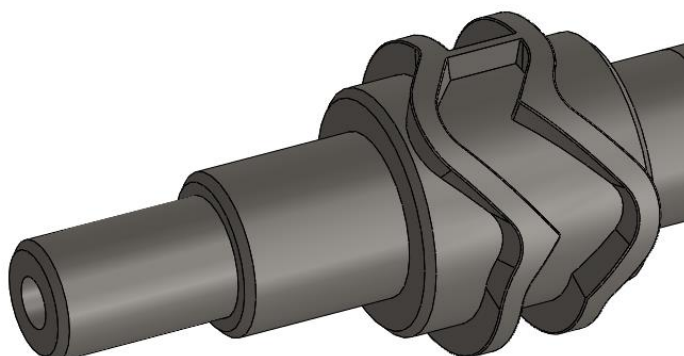


Figura 26. Final de carrera para evitar el paso de 6ª a 1ª

8.5.3. Estrella (IBT-01-06-02)

Como se ha comentado previamente, el giro del tambor selector se puede realizar de diferentes maneras. En éste caso, se necesita dividir una vuelta completa en 7 tramos. Si se divide una circunferencia en 7 tramos iguales, se puede obtener una especie de estrella que sirva de referencia para el giro, ya que girar 51.43° manualmente a ojo es completamente imposible.

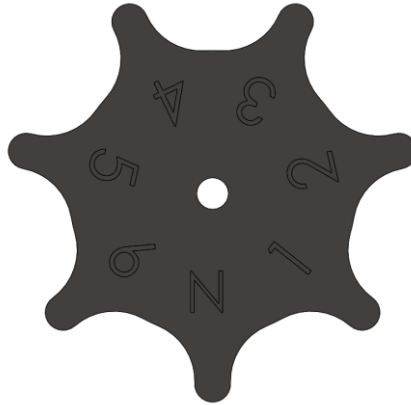


Figura 27. Estrella de siete puntas

Atornillando la estrella al tambor, se consigue controlar el giro y por lo tanto, la marcha a la que queremos cambiar.

8.6. Acople motor (IBT-01-05-02)

A la hora de transmitir potencia entre dos ejes, se pueden utilizar diferentes mecanismos basados en poleas y correas, acoplamientos rígidos, flexibles, de trinquetes, de engranajes, etc. Con el fin de ahorrar espacio y tener que cambiar sólo una pieza si se cambia el motor, se diseña el siguiente acople:

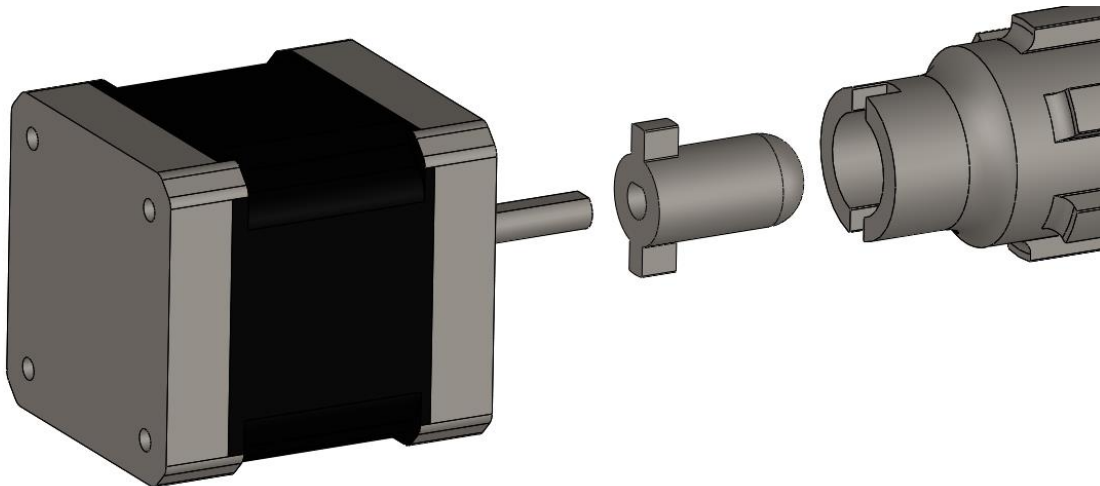


Figura 28. Acople motor/eje primario

De ésta manera, si se necesita cambiar el motor por uno más potente que tenga un eje de distinto diámetro, sólo será necesario rediseñar y fabricar la pieza intermedia, ahorrando horas de impresión.

8.7. Soportes de la transmisión (IBT-01-04-01 e IBT-01-04-02)

Una vez completado el diseño del cambio, tenemos la transmisión casi definida, pero con los elementos con una posición sin determinar. Se requiere diseñar una carcasa que agrupe los dos ejes, el tambor, el motor, la electrónica etc.

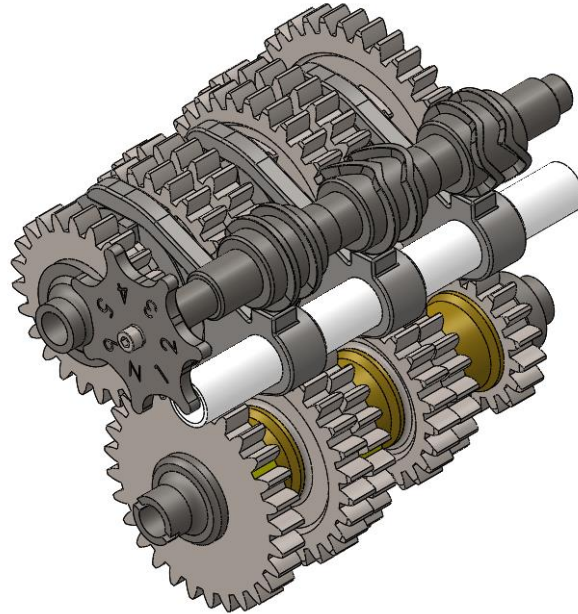


Figura 29. Disposición de los elementos tras el diseño del cambio

Para ello se diseña una carcasa de “entrada”. Denominada así puesto que es la parte más próxima al motor. Será la encargada de contener el motor y la electrónica, además de los ejes. Por facilitar la fabricación y disponer de una cara plana sobre la que imprimir, la carcasa se divide en dos piezas. Una tiene exclusivamente los alojamientos de los rodamientos de los ejes y la otra el motor y electrónica:

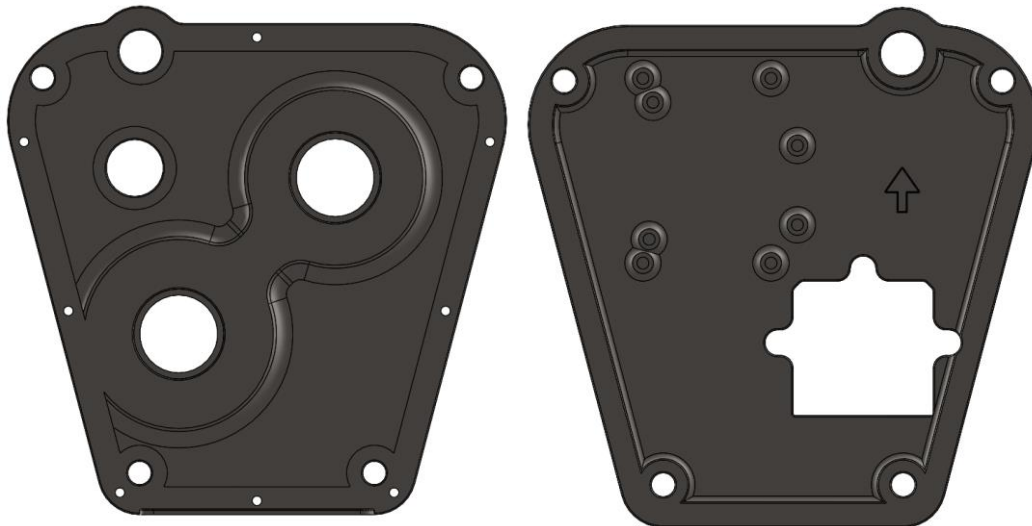


Figura 30. Izda (IBT-01-04-01), dcha (IBT-01-04-02)

La geometría en forma de V intenta imitar la típica forma de las transmisiones de F1 actuales, debido a su motor de 6 cilindros en V, a la vez que intenta equilibrar pesos y dar estabilidad al

conjunto. La unión entre ambas piezas es atornillada. La referencia para el cambio es la flecha, que deberá coincidir con la punta de la estrella de la marcha que se quiera engranar.

8.8. Electrónica

La unidad de motor de la que se dispone para dar movimiento a la caja de cambios es un motor paso a paso unipolar Nema 17 de 1.2ª por fase, muy utilizado en aplicaciones como máquinas CNC, impresoras 3D y cualquiera aplicación que se necesite controlar de manera precisa la posición y velocidad. Éstos controles, necesitan de un control electrónico para funcionar.

La placa EasyDriver tiene un controlador A3967 que permite trabajar con motores paso a paso de 4, 6 u 8 cables, siempre que sea controlada desde sistemas de 3.3V o 5V. Esto implica que con un Arduino y una placa EasyDriver se podrá controlar fácilmente el motor.

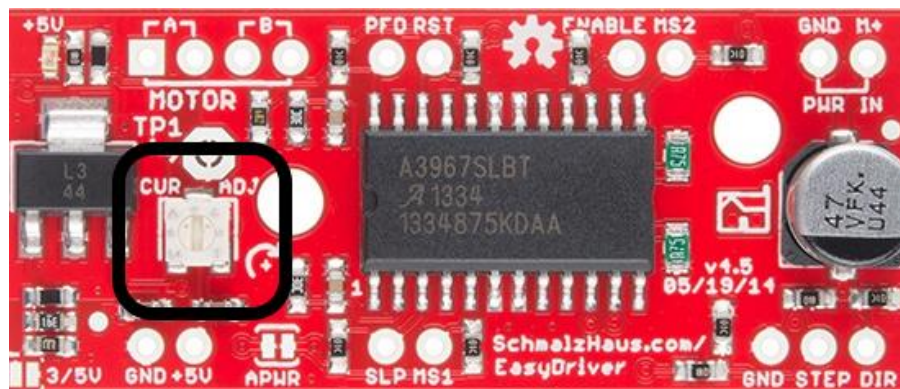
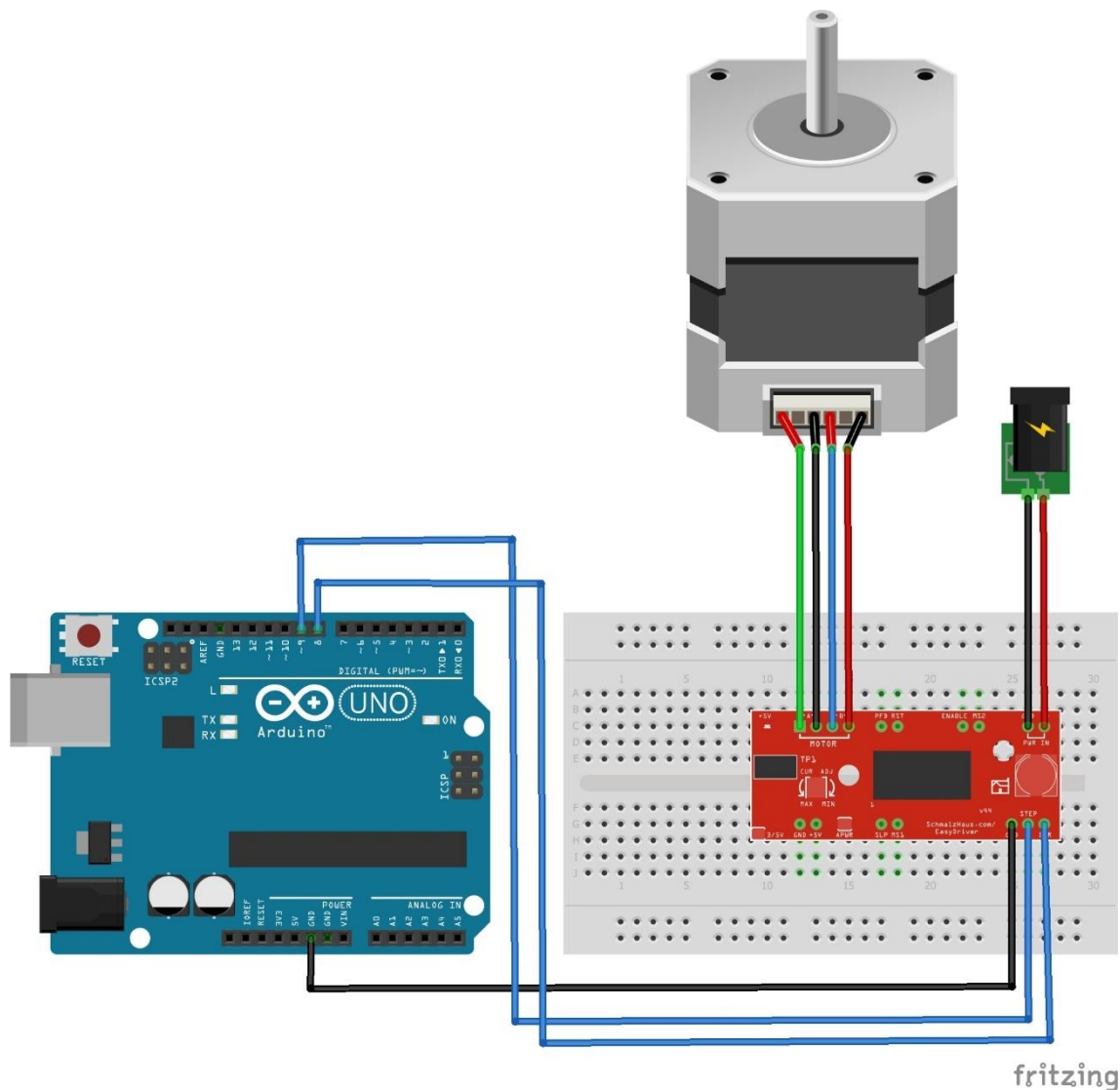


Figura 31. Ajuste corriente máxima driver

El driver, o controlador, es el que suministra la corriente al motor, en función de la programación en Arduino. La corriente máxima capaz de ofrecer es de 750 mA, inferior a los 1.2 A del motor, por lo que no habrá problemas aunque la corriente sea máxima. Aun y así, cuanto mayor sea la corriente mayor será el par del motor, pero el calentamiento del Driver será muy alto, por lo que se debe regular la corriente al valor mínimo con el que el motor tenga fuerza suficiente para mover la transmisión. Esto se consigue girando el potenciómetro remarcado en la imagen anterior, con ayuda de un destornillador.

Las conexiones de los componentes electrónicos será la siguiente:



Para dar movimiento a la transmisión, basta con que el motor gire a velocidad constante. Para ello sólo es necesario alimentar el EasyDriver con una fuente de alimentación de entre 5V y 30V (en éste caso se utilizará una de 12V y 2A), conectar los cuatro cables de las fases A y B del motor (sin importar el orden pues no tienen polaridad) y utilizar los pines Step (Pin digital 9), Dir (Pin digital 8) y GND. Se introduce el siguiente código en Arduino, que hará que el motor gire a velocidad constante en una dirección.

La alimentación de Arduino se puede realizar mediante una pila de 5V o mediante un cable USB, ya sea conectándolo al ordenador o con un adaptador a la red.

```
void setup() {  
  pinMode(8, OUTPUT);  
  pinMode(9, OUTPUT);  
  digitalWrite(8, LOW);  
  digitalWrite(9, LOW);  
}  
  
void loop() {  
  digitalWrite(9, HIGH);  
  delay(0.1);  
  digitalWrite(9, LOW);  
  delay(1);  
}
```

En la primera función se definen el estado inicial y el tipo de variables del sistema. Es decir, se utilizarán las salidas digitales 8 y 9, que estarán en un estado bajo al comienzo del programa. La función loop es el bucle que se repite una y otra vez, en donde se genera una señal cuadrada, poniendo a alto y bajo la salida 9, que al estar conectada a la entrada Step del EasyDriver, el motor girará un paso cada vez que su estado sea alto. Jugando con el tiempo entre el estado alto y bajo de la señal cuadrada, se variará la velocidad de giro del motor. En éste caso se deja en 0.1 ms. La salida 8 no se modifica pues no se actúa sobre el giro del motor, siempre será en el mismo sentido.

9. FABRICACIÓN

Se va a fabricar un prototipo de la caja de cambios para poder validar el diseño y comprobar su correcto funcionamiento. Por comodidad, sencillez y bajo coste, la fabricación aditiva por deposición de material fundido, más conocida como impresión 3D, ha ido ganando peso en la industria en los últimos años, y será la técnica elegida para el desarrollo de éste proyecto.

9.1. Impresora utilizada

Hoy en día, existen multitud de técnicas de fabricación aditiva, como puede ser el modelado por deposición de material fundido (*FDM* de sus siglas en inglés) o la estereolitografía (*SLA*). Para cada técnica, hay diferentes máquinas en el mercado, cada una con diferentes mecánicas, capaces de trabajar con un rango de materiales muy variado.

En éste caso, se dispone de una impresora *FDM* con estructura cartesiana. Es decir, la fabricación de la pieza se realiza fundiendo el material y recorriendo la trayectoria de la pieza en cada capa a lo largo de los ejes XYZ. Se trata una de las mecánicas más comunes, por su sencillez y bajo coste, aunque las velocidades de trabajo no son muy altas.



Figura 32. Creality Ender 3 Pro, impresora utilizada

NOTA:

La impresora Ender 3 Pro, de la casa China Creality, ha sido top ventas en los últimos años. Es capaz de ofrecer unos acabados buenos, suficientes para éste proyecto, pero no deja de ser una impresora China de acceso a la gama, por lo que la precisión lograda va a depender del buen mantenimiento y uso que se le dé, así como del nivel de manejo y modificaciones que desee implementar el propietario. Los diferentes ajustes y tolerancias que se van a explicar en éste apartado pueden variar al usar otra impresora distinta.

9.2. Laminador

Como se ha mencionado anteriormente, el sistema de referencia usado por la impresora es cartesiano, por lo que la máquina sólo interpreta coordenadas XYZ y velocidades de extrusión (cantidad de material que tiene que expulsar en cada punto), no volúmenes, ni texturas como en los programas CAD. Para realizar ésta transformación de información se necesita la ayuda de un software externo, denominado laminador o *slicer* en inglés. Para ello se siguen los siguientes pasos:

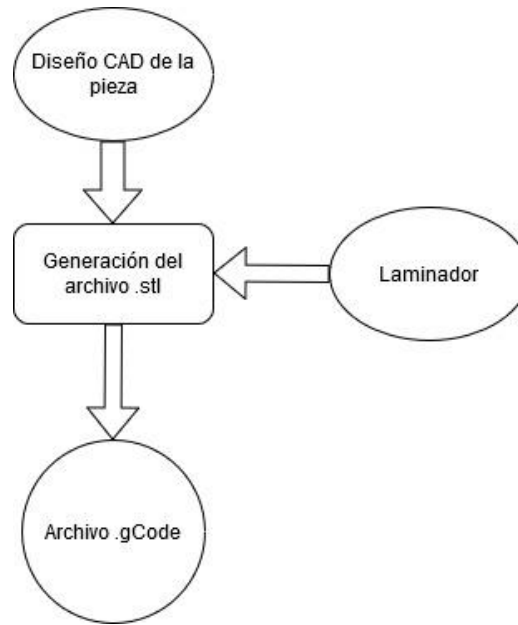


Figura 33. Diagrama de flujo preparación de pieza

Lo primero de todo se debe partir de la pieza diseñada en 3D en cualquier programa. Las piezas se guardarán en diferentes formatos, dependiendo del software usado (.sldprt en SolidWorks, por ejemplo), y contendrán información de relleno, geometría y texturas. Por facilitar la compatibilidad entre diferentes softwares, existen formatos universales como el .stl, que triangula todas las caras de la pieza y conserva la geometría exterior, perdiendo información como textura, relleno, color, propiedades físicas etc. Éste tipo de archivo informático es el usado por todos los laminadores (existen otros como el .obj). Se guarda la pieza con la extensión .stl y está lista para ser procesada en el laminador.

Existen diferentes Slicers, cuyo funcionamiento siempre es similar. En éste proyecto se utilizará Cura, un software gratuito reconocido a nivel mundial. En el laminador, el usuario selecciona todos los parámetros que desea aplicar a la pieza y la configuración de la impresora en función del material usado (temperaturas, velocidades, etc). Teniendo esto en cuenta, el programa genera el código (.gCode) que leerá la impresora:

G1 Z2.0 F3000 ; Move Z Axis up little to prevent scratching of Heat Bed

G1 X0.1 Y20 Z0.3 F5000.0 ; Move to start position

G1 X0.1 Y200.0 Z0.3 F1500.0 E15 ; Draw the first line

G1 X0.4 Y200.0 Z0.3 F5000.0 ; Move to side a little

G1 X0.4 Y20 Z0.3 F1500.0 E30 ; Draw the second line

G92 E0 ; Reset Extruder

Como puede verse, es un código usado en otro tipo de aplicaciones como en las máquinas de control numérico. La impresora lee a que punto tiene que moverse, con qué velocidad, y cuánto material ha de extruir. La suma de todos esos puntos para cada una de las capas hace que al final se obtenga el objeto 3D.

9.3. Parámetros de impresión

Como se ha mencionado antes, el formato de archivo .stl pierde una gran cantidad de información relevante que será necesaria configurar en el laminador, como por el ejemplo el relleno. El usuario deberá ser capaz de adaptar los parámetros de laminado para cada pieza, en función de las propiedades mecánicas que se le vayan a exigir, o el uso al que vaya a ser sometida. En éste proyecto se van a explicar los que más afectan al funcionamiento de la caja de cambios, pero hay muchísimos más que, dominándolos, mejoran exponencialmente la calidad de las impresiones.

9.3.1. Velocidad

El mayor problema de éste tipo de proceso de fabricación es el tiempo. Pese a ser llamado prototipado rápido, una pieza puede llegar a tardar decenas de horas en producirse, dependiendo de la geometría y la configuración de diferentes parámetros realizada. Uno de ellos es la velocidad a la que se moverá el cabezal mientras extruye material. Velocidades altas implican menor tiempo total de impresión, pero sacrificando calidad. Por el contrario, una velocidad más lenta implica mayor control, mejor calidad y mayor tiempo final de fabricación. EN función del uso de la pieza, habrá que buscar la velocidad idónea.

9.3.2. Altura de capa

Como su propio nombre indica, es la altura de cada una de las capas en las que ha segmentado la pieza el laminador. A mayor altura de capa, menos capas habrá y más rápida será la impresión, pero el acabado de la pieza será peor. Se recomienda un valor máximo igual al 80% del diámetro de la boquilla utilizada para extruir el material. La Ender 3 Pro viene equipada con una boquilla de 0.4 mm de diámetro, por lo que la altura de capa máxima será 0.32 mm.

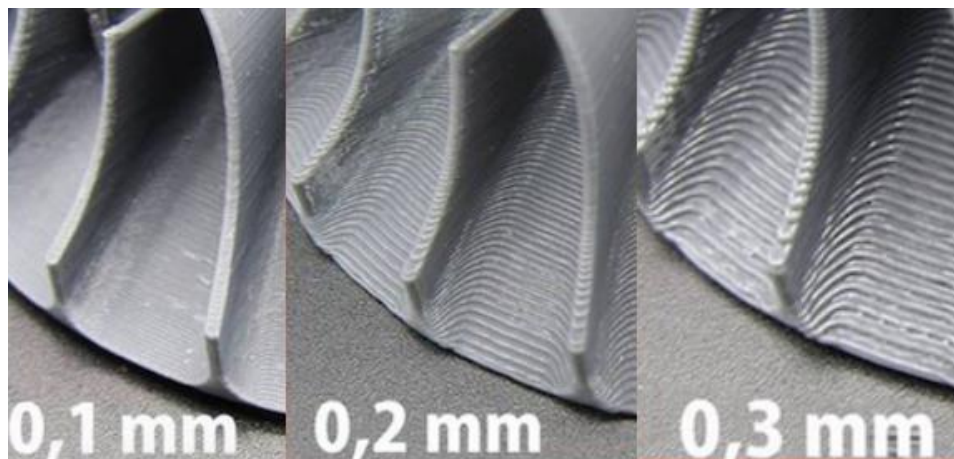


Figura 34. Diferentes acabados superficiales para cada altura de capa

De nuevo, se trata de encontrar el equilibrio entre tiempo y acabado de la pieza, en función del uso que se le vaya a dar.

9.3.3. Relleno

Las piezas son huecas por defecto, puesto que el archivo .stl no tiene relleno. En prácticamente la totalidad de los casos es necesaria una estructura interna que soporte los esfuerzos mecánicos y haga de soporte de impresión para las capas superiores de las piezas. Si por ejemplo intentáramos imprimir un cubo de tamaño medio hueco, la cara superior se imprimiría sobre el aire, cosa imposible para grandes áreas.

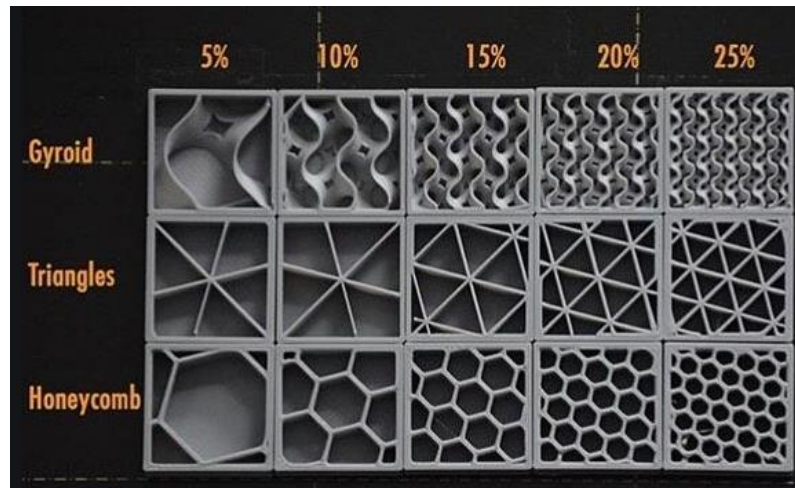


Figura 35. Diferentes configuraciones de relleno

El laminador te permite elegir qué tipo de relleno usar y en qué porcentaje. A mayor cantidad de relleno, la pieza costará más, tanto en tiempo como en precio, pero será más resistente.

9.3.4. Número de perímetros

El parámetro más a tener en cuenta a la hora de obtener unas piezas resistentes. Mide la anchura de la pared de la pieza, que viene dada por la siguiente fórmula:

$$e = N * \phi_{boquilla} ;$$

-Siendo N= nº de perímetros

En éste proyecto se han usado valores desde 0.8 mm (2 perímetros) para piezas que no están sometidas a esfuerzos mecánicos hasta 2 mm (5 perímetros) para las piezas estructurales más críticas.

9.3.5. Expansión horizontal de agujeros

A la hora de diseñar conjuntos mecánicos que van a ser fabricados con una impresora 3D, hay que tener en cuenta diferentes aspectos, como pueden ser la tolerancia de la máquina o la contracción del material al enfriarse, que puede variar en función del tipo de material y el tamaño de la pieza.

Si se quiere un ajuste determinado entre un eje y un agujero, habrá que hacer diferentes pruebas variando las medidas hasta dar con el deseado, lo que implicaría modificar el CAD y seguir todo el proceso descrito en el diagrama de flujo anterior para cada test. Para evitar esto, muchos laminadores incluyen la posibilidad de introducir una expansión horizontal (tanto

positiva como negativa) de cada una de las capas de toda la pieza, o sólo de los agujeros. De ésta manera se ahorra tiempo y se facilita la realización de diferentes test de ajustes.

9.4. Material

A la hora de escoger el material para la fabricación del prototipo se han tenido en cuenta los siguiente:

- Precio
- Facilidad de impresión
- Resistencia mecánica

Existen multitud de materiales, pero no todos poseen las mismas características, lo que hace obligatorio elegir uno en base al objetivo del proyecto. Entre los candidatos están:

- PLA: El más utilizado hoy en día para aplicaciones que no requieran de gran resistencia mecánica, puesto que es muy duro pero frágil. Barato y muy sencillo de imprimir. No presenta *warping* (levantamiento de la pieza durante la impresión) ni *cracking* (mala adhesión entre dos capas que produce una grieta en la pieza). Baja resistencia a la temperatura.
- PETG: Presenta mejores propiedades mecánicas que el PLA, aunque es algo más caro y difícil de imprimir. Su resistencia a la temperatura es algo superior y carece de toxicidad, lo que lo hace idóneo para aplicaciones alimenticias.
- ABS: El mejor en cuanto a propiedades mecánicas y resistencia a temperaturas sin deformarse. Requiere de temperaturas de impresión mayores y de un lugar cerrado puesto que es muy sensible a cambios bruscos de temperatura y genera gases tóxicos durante su impresión. Muy utilizado en automoción o en juguetes como Lego.
- Nylon, fibra de carbono, etc: Éstos materiales técnicos son los ideales para aplicaciones como la caja de cambio (altas resistencias mecánicas y térmicas, estabilidad dimensional, baja fricción) pero su complejidad es tal que es prácticamente imposible trabajar con ellos en una impresora de gama baja como de la que se dispone.

Teniendo en cuenta que los esfuerzos a los que está sometida la caja de cambios no son altos, se ha decidido primar la simplicidad y el bajo coste que supondría tener fallos durante la fabricación, eligiendo el PLA como el material a usar.

9.5. Calibración de los motores

Puesto que se va a fabricar un conjunto mecánico con numerosos ajustes entre piezas, se requiere repetitividad y precisión a la hora de imprimir las piezas. Para ello se imprime un cubo de 20 mm de lado con las letras X,Y y Z inscritas en su cara correspondiente. Es decir, donde se indica X, corresponde a la medida a lo largo del eje X de la impresora.

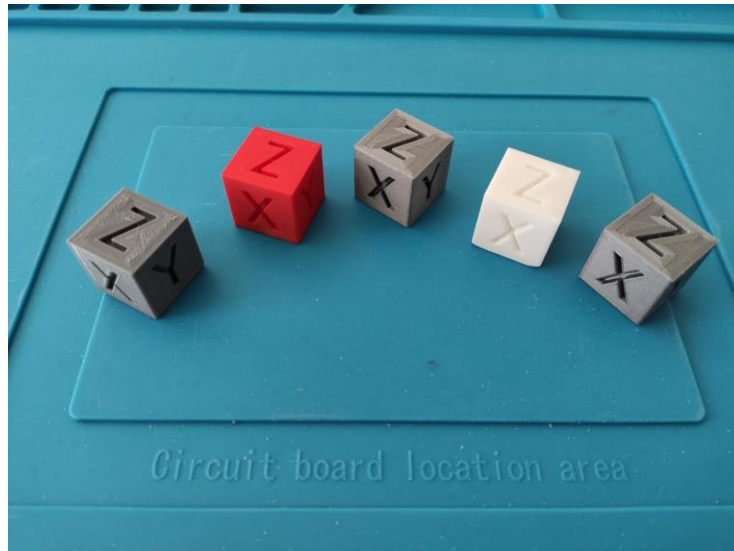


Figura 36. Cubos de calibración

Cada eje de la impresora es movido por un motor paso a paso al que se le asocia un número de pasos determinado para cada milímetro que queremos mover su eje. Tomamos medidas de las diferentes aristas de un primer cubo de calibración, observando lo siguiente:

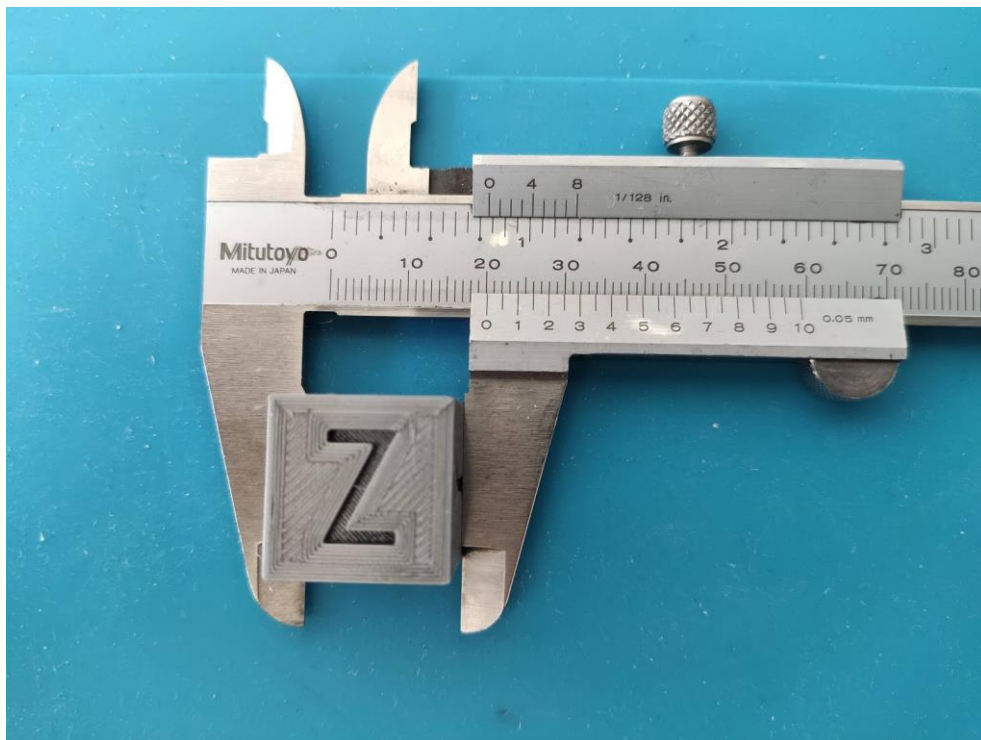


Figura 37. Medida sobre el eje X antes de la calibración

Los ejes X y Z miden 20 mm, por lo que no es necesario actuar sobre ellos. Sin embargo se obtiene una medida de 20.15 mm sobre el eje X, por lo que es necesario ajustarlo. Para ello consultamos los pasos/mm actuales del eje X y observamos que son 80 pasos/mm, y aplicamos la siguiente fórmula:

$$\text{nuevos} \frac{\text{pasos}}{\text{mm}} = \frac{20\text{mm} * 80 \text{pasos/mm}}{20.15\text{mm}} = 79.4 \text{pasos/mm}$$

Introducimos el nuevo valor de pasos/mm en la configuración del motor del eje X y se vuelve a imprimir un cubo de calibración, obteniendo el siguiente resultado:

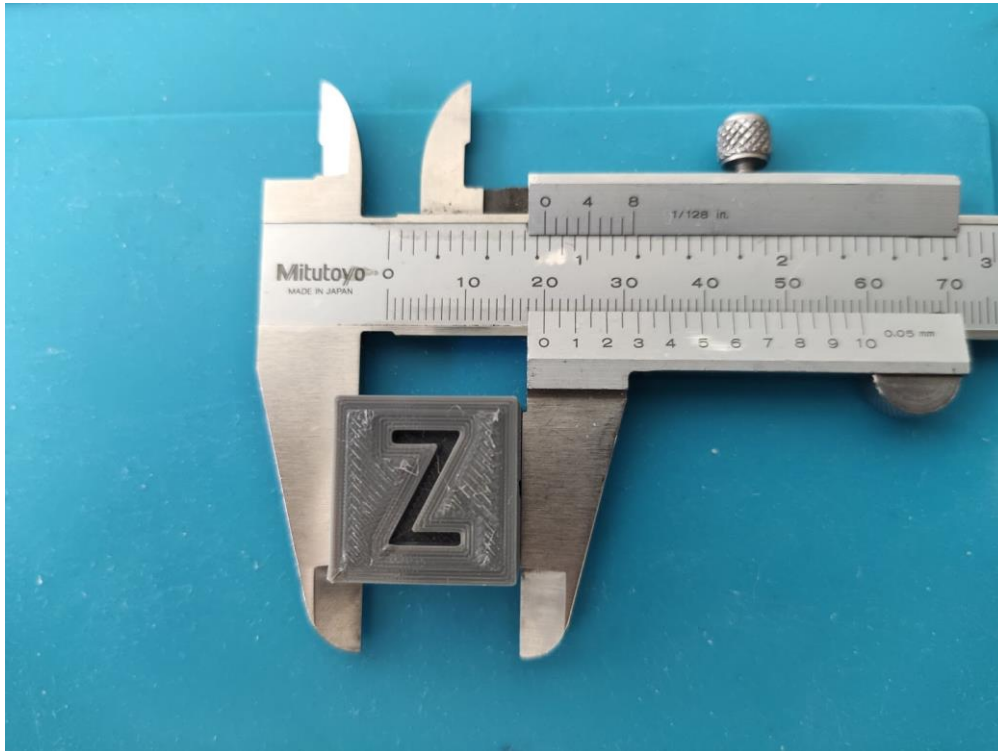


Figura 38. Medida sobre el eje X tras la calibración

La medida sobre el eje X es 20 mm, por lo que no es necesario un nuevo reajuste de los pasos del motor. Se tiene un control sobre la medida de las piezas impresas en las direcciones X,Y y Z por lo que se da por calibrada la máquina, y puede pasarse a imprimir piezas de la caja de cambios.

9.6. Test de ajustes

En este apartado se invertirán unas pocas horas de impresión, pero permitirá conocer las medidas que se deben dar a determinadas piezas del conjunto que van unas dentro de otras. Una vez hecho esto, se podrá empezar a fabricar piezas definitivas teniendo la certeza que los ajustes entre piezas van a ser los deseados y que no será necesario, por ejemplo, volver a imprimir un eje entero porque no entra dentro del rodamiento.

Los diferentes ajustes van a ser:

- Rodamientos/ejes
- Engranajes/eje primario
- Ejes/separadores/arandela
- Ejes/anillo de retención
- Eje del deslizador/deslizador



Figura 39. Secciones de piezas para los test de ajustes

9.6.1. Test 1

Éste primer test tiene como objetivo determinar el valor de expansión horizontal que se configurará para las arandelas, espaciadores, separadores y engranajes del eje primario, así como de la obtención de la medida del tramo de los ejes que se introduce en los rodamientos de bolas ubicados en las carcasas.

Se imprime el último tramo del eje primario, incluyendo un trozo de la zona nervada con un huelgo eje/rodamiento de 0.1 mm. Es decir, al ser un rodamiento con un diámetro interno de 20 mm, el eje medirá 19.9 mm.

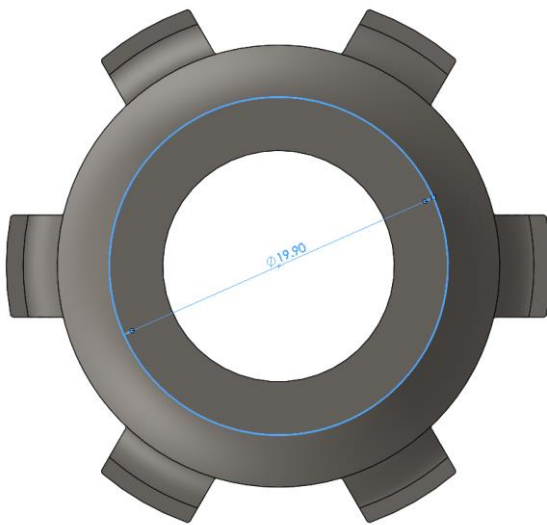


Figura 40. Ajuste eje/rodamiento de 0.1 mm

Sin necesidad de hacer más pruebas, el resultado es satisfactorio con 0.1 mm. El eje asienta bien en la pista interior del rodamiento y gira solidaria a él, y no presenta dificultad alguna a la hora de introducirlo y sacarlo. Se fija la medida de 19.9 mm y ya se puede imprimir entero, puesto que el resto de piezas se adecuarán a las medidas del eje utilizando la expansión horizontal de agujeros.

Para continuar con el test, la filosofía que se va a seguir es la siguiente. El eje y las piezas que van sobre él se diseñan en CAD con las mismas medidas teóricas. El eje se fabricará con esas medidas reales, y se aprovecharán los agujeros de las piezas que van sobre éste para hacer que sean unas décimas más grandes, dependiendo el ajuste que se les quiera dar, desde el laminador.

Las piezas que no deslizan sobre el eje no requieren de un ajuste fino, pues girarán solidarias. Viendo el resultado del ajuste del rodamiento, se propone un valor de expansión horizontal de agujeros de 0.3 mm. Éste valor se aplica a los engranajes del eje primario, las arandelas, y los separadores del eje primario.

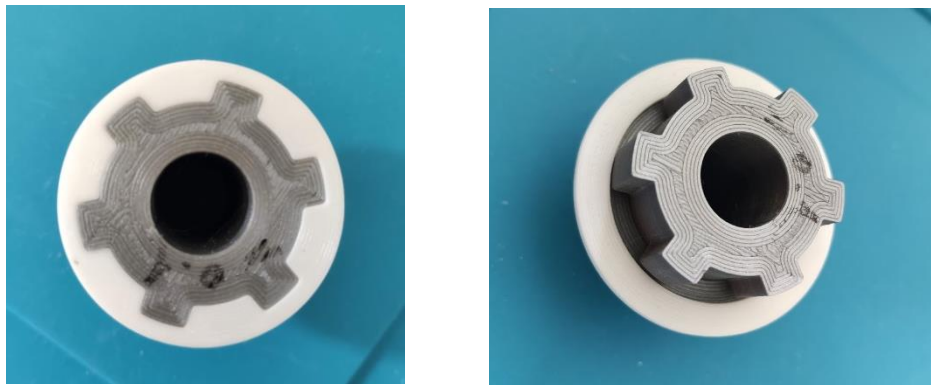


Figura 41. Ajustes eje nervado

Las piezas entran sin ningún esfuerzo, pudiendo buscarse un ajuste más fino de entorno a 0.2 mm, pero se decide dejarlo así puesto que el funcionamiento de la caja va a ser el mismo con un valor que con otro, y se facilita el montaje del eje primario.

Para finalizar el primer test, es necesario determinar la expansión de los anillos de retención de ambos ejes. La función de éstas piezas es compactar ambos ejes y evitar que se salgan los engranajes y demás piezas del conjunto, por lo que es necesario un ajuste más fino. Viendo el resultado al expandir 0.3 mm, se decide probar con 0.2 mm.



Figura 42. Ajuste fino anillo de retención

El anillo entra siendo necesario ejercer una ligera fuerza y queda firme en su posición. Se decide dejar el valor de expansión horizontal en 0.2 mm, ya que de ser necesario ajustarlo, es una pieza muy rápida de volver a imprimir, no suponiendo ningún problema.

CONCLUSIONES:

- Los ajustes con piezas metálicas como rodamientos pueden ser mucho más finos, entorno a la décima de milímetro.
- Si se necesita que la pieza entre sin esfuerzo, un valor de 0.3 mm parece suficiente.
- Si por el contrario se necesita un ajuste más preciso, pero sin llegar a complicar el montaje, el valor estará en torno a 0.2 mm.

9.6.2. Test 2

En éste segundo test, se pretende fijar las medidas del eje del deslizador y la expansión horizontal de los agujeros del deslizador. Con éste último test se obtiene información de todos los tipos de ajustes presentes en la caja de cambios, por lo que se podrá proceder a la fabricación. Para ello se imprime una sección del eje del deslizador, evitando fabricarlo entero y ahorrando tiempo:

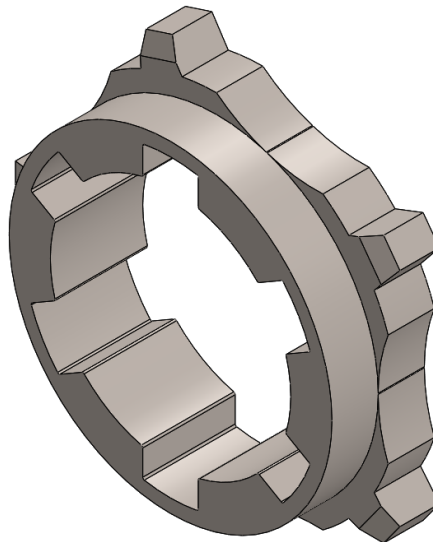


Figura 43. Sección del eje del deslizador test 2

En la pieza sólo hay un agujero, que al ser el mismo tipo de eje nervado que el primario, se le aplicará una expansión horizontal de 0.3 mm, como se ha visto en el test 1. El resto de medidas no se pueden modificar en el laminador, por lo que tienen que venir definidas en el CAD.

Sobre la parte cilíndrica gira un rodamiento HK3512 de 35 mm de diámetro interno, por lo que en relación al resultado del primer test, el ajuste estará en torno a 0.1 mm. En éste caso el valor obtenido es de 0.08 mm, por lo que el diámetro exterior del cilindro será 34.92 mm.

La expansión horizontal del deslizador ha sido la más complicada de obtener, puesto que si se configura un valor bajo, la fricción es muy alta y las piezas no deslizan entre sí. Si por el contrario la holgura es mayor, puede llegar a deslizarse perdiendo la horizontalidad.

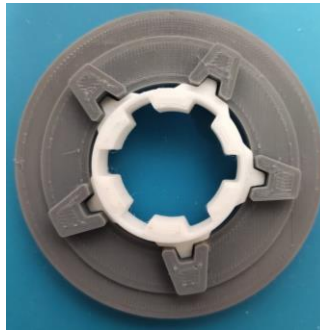


Figura 44. Ajuste eje/deslizador

Tras varias pruebas, se fija el valor de EHA en 0.28 mm. La holgura es suficientemente grande como para deslizar con facilidad lubricando el eje, y la desalineación no es tan grande como para afectar en el funcionamiento del sistema.

9.7. Fabricación de piezas impresas

Una vez conocidas las medidas que se han de dar para los distintos tipos de ajustes se puede proceder a imprimir todas las piezas. Al haber muchas cuya impresión es igual o similar, se puntualizarán las que su fabricación es distinta y en las demás se seguirán las siguientes indicaciones.

- Se imprimirá con la cara plana de la pieza sobre la superficie de impresión, con el fin de ahorrar material de soporte.
- Si la pieza desliza sobre otra se imprimirá con una altura de capa menor, en torno a 0.18 mm.
- Cuanto mayor resistencia mecánica se necesite, mayor espesor de pared (Nº de perímetros) y mayor densidad se aplicará.
- Cuanto menor sea la pieza, menor será la velocidad de impresión.

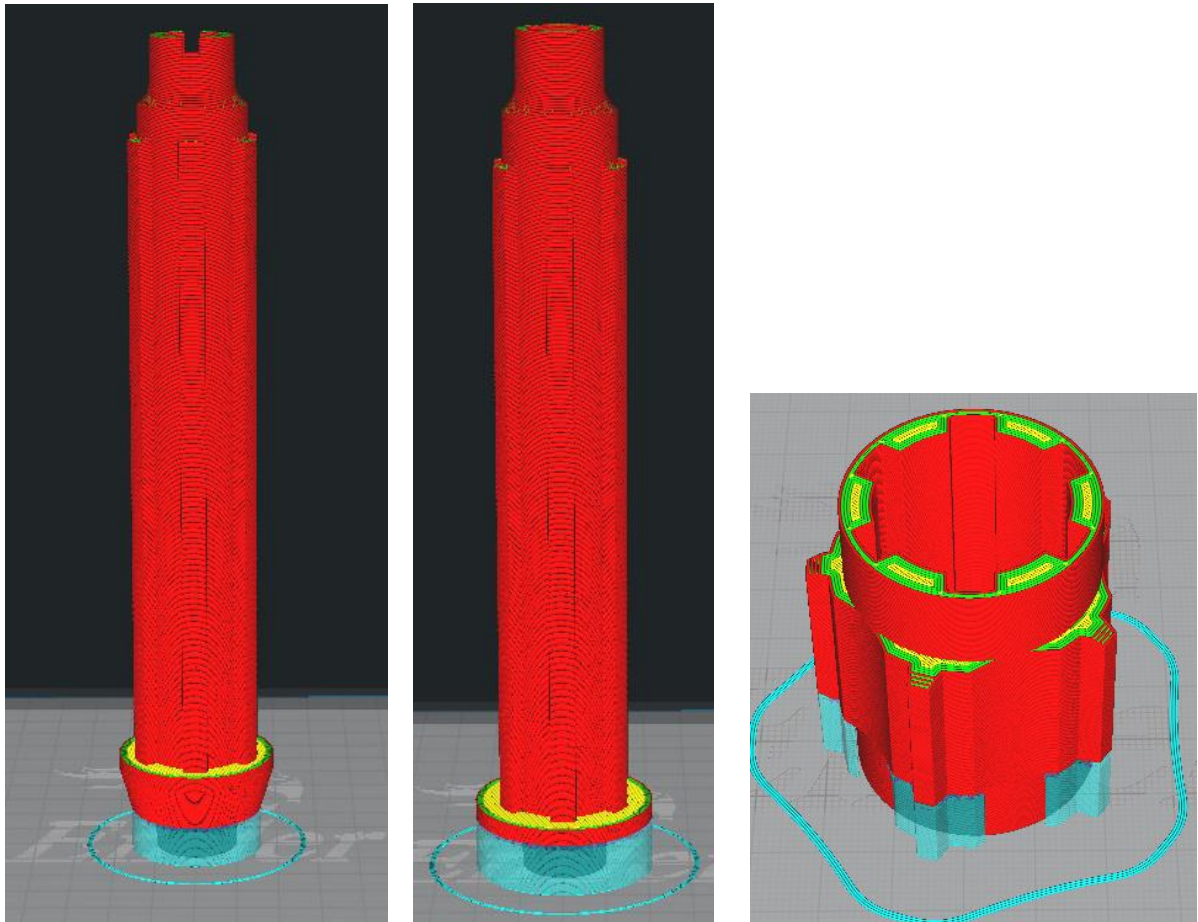
9.7.1. Ejes primario, secundario y del deslizador

En materiales anisótropos como la fibra de carbono o la madera, se deben construir las fibras en la dirección de los esfuerzos, para maximizar la resistencia de la pieza. En impresión 3D, podría considerarse el mismo principio y se debe intentar imprimir de manera que las líneas de cada capa sigan la dirección de las tensiones de la pieza. En la práctica, otros valores como la adhesión entre capas juegan un papel más importante, puesto que si las capas no se pegan entre ellas se va a obtener una pieza frágil y poco resistente, independientemente de la orientación de las fibras.

Los ejes de la caja de cambios van a estar sometidos a momentos flectores y a torsión, por lo que, si es posible, se deberían intentar imprimir en posición horizontal, tumbados sobre la plataforma de impresión. Esto implica la necesidad de usar soportes, por lo que la calidad de las superficies que se imprimen sobre el soporte será peor y el tiempo de impresión mucho mayor.

En éste caso se opta por la calidad de impresión, imprimiendo el eje primario, secundario y del deslizador, en posición vertical. De ésta manera, imprimiendo despacio (35 mm/s), con 1.6 mm de grosor de pared (4 perímetros), una altura de capa de 0.2 mm y un % de relleno elevado

(40%), se consiguen piezas muy resistentes y con un buen acabado, independientemente de la orientación.



Los colores corresponden a cada uno de los tipos de línea que usa el laminador, como por ejemplo rojo para la pared exterior, azul para los soportes, verde para las paredes interiores o amarillo para el relleno.

Figura 45. Laminado de eje primario, secundario y del deslizador, respectivamente



Figura 46. Los tres ejes ya impresos

Los dos ejes más largos (eje primario y secundario) han supuesto una de las mayores dificultades de impresión puesto que al tener cerca de 1000 capas, han sido las piezas más largas de imprimir (15.1 horas el eje secundario) y su elevada altura implica que cada movimiento y vibración de la máquina pueda afectar a la calidad de la impresión durante el último tramo. Afortunadamente, se consigue una buena calidad y resistencia en las piezas, por lo que se prosigue con la fabricación.

9.7.2. Engranajes

Las ruedas dentadas son unas de las piezas más importantes, pues son las encargadas de la transmisión de movimiento, pero a su vez unas de las más fáciles de imprimir puesto que tienen una cara plana que apoyará sobre la plataforma de impresión, y no requieren de material de

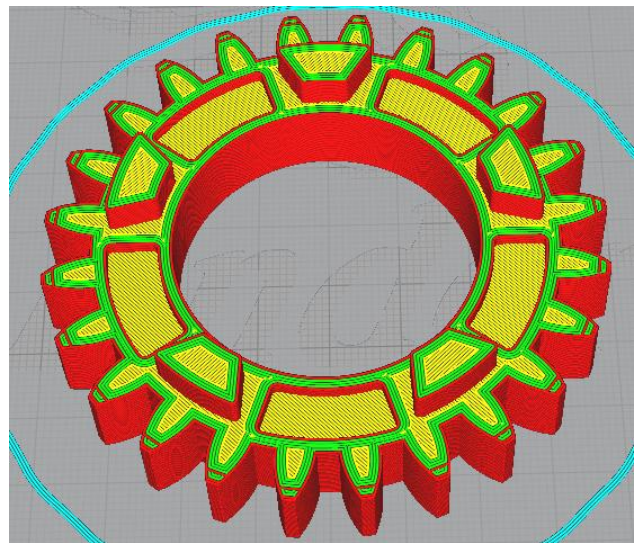
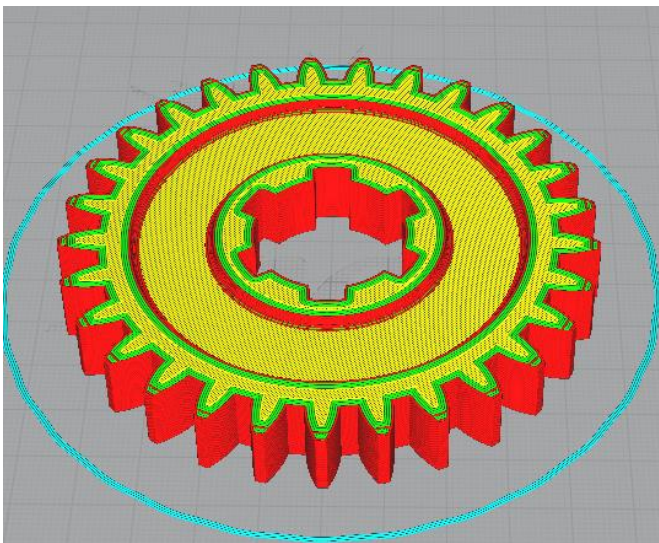


Figura 47. Laminado de una rueda dentada y secundaria respectivamente

soporte. Para asegurar la buena resistencia mecánica, al igual que los ejes se configuran con 4 perímetros y un relleno del 35%. El agujero de los engranajes primarios se le aplica una expansión de 0.3 mm como se vio en el test de ajustes, y el agujero donde encaja el rodamiento de agujas de las ruedas secundarias 0.26 mm.

Como se puede ver en la *Figura 16* las piezas se apoyan sobre su cara plana y la pieza carece de dificultad a la hora de imprimirse, obteniéndose unas piezas resistentes con buenos acabados, como puede verse a continuación:



Figura 48. Las 6 ruedas dentadas del eje primario, ya fabricadas



Figura 49. Engranajes secundarios impresos, con rodamientos instalados

9.7.3. Barril selector

Al contrario que el resto de ejes, el barril selector ha de imprimirse de manera horizontal. AL tener ranuras por donde deslizará la cabeza del tornillo, esas caras han de tener el mejor acabado posible. Si se imprimiera en posición vertical, sería necesario material de soporte entre las ranuras, que sería costoso de quitar e impediría el correcto deslizamiento del tornillo, como puede verse a continuación:

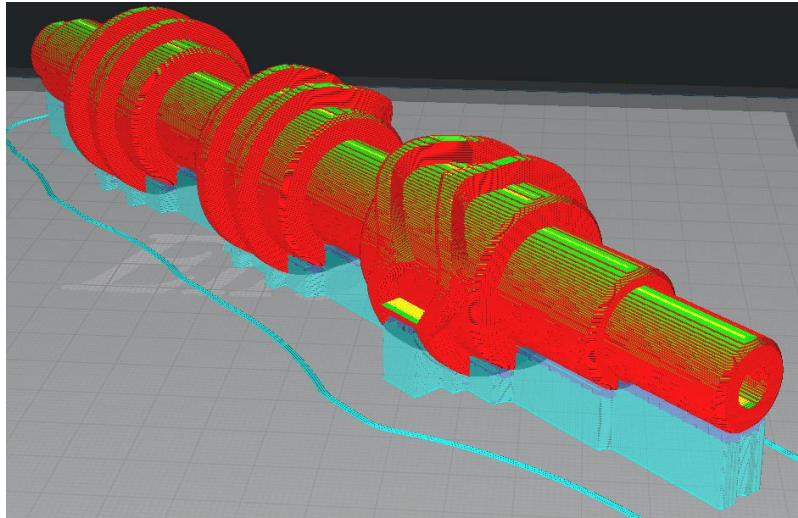
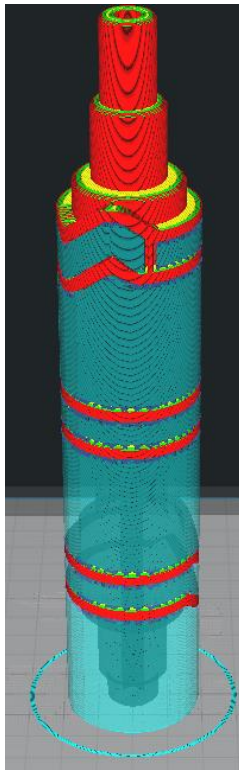


Figura 50. Orientación de impresión del barril selector

Como puede verse en la *Figura 18*, la impresión horizontal requiere de menos soportes (azul) y éstos soportan material cuyo acabado superficial no es crítico para el funcionamiento del sistema, por lo que es la orientación elegida.



Figura 51. Barril selector impreso

9.7.4. Horquilla

La horquilla se trata de una de las piezas más complicadas por dos motivos. El primero su orientación a la hora de imprimirse, y el segundo la medida del agujero por donde pasa el tubo de PVC, puesto que si la holgura es grande la horquilla se inclina y compromete el funcionamiento del sistema.

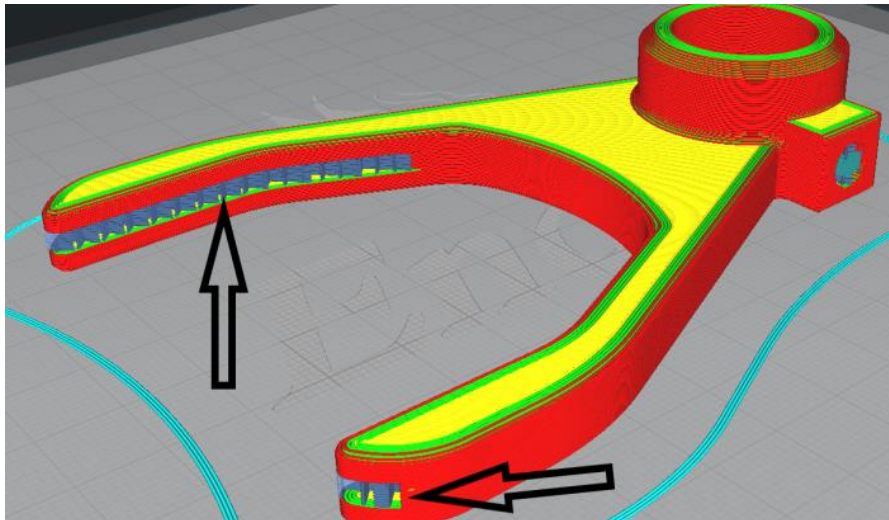


Figura 52. Horquilla en posición horizontal

Al estar diseñada toda la pieza sobre una cara plana, puede pensarse que la orientación más sencilla es la descrita en la figura anterior. Así se fabricó la primera horquilla, resultando imposible retirar los soportes de dentro de la ranura (color azul oscuro). Se realizó un segundo intento con la pieza en posición vertical.

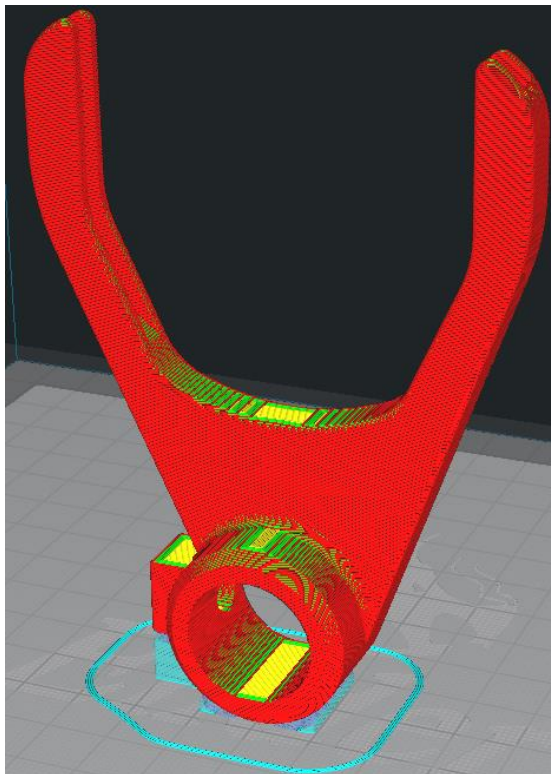


Figura 53.. Horquilla en posición vertical (izda) e impresa (dcha)

Ésta vez la pieza no requiere de soportes en zonas críticas, y la fabricación es exitosa. Cabe destacar la necesidad de imprimir varias pruebas hasta dar con el ajuste óptimo y la rigidez requerida por los brazos, puesto que al estar impresos en vertical, cualquier problema en la adherencia de las capas durante la impresión producía una fragilidad que podía llegar a partir los brazos. Las medidas finales puedes consultarse en el anexo *Planos*.

9.7.5. Piezas generales

La mayoría de piezas no tienen ninguna dificultad técnica a la hora de fabricarse. Esto es debido a su diseño simple para facilitar la impresión, la calidad de los materiales y al buen ajuste de la máquina y del laminado. Siguiendo los criterios descritos al comienzo del apartado se siguen fabricando todas y cada una de las piezas, algunas de las cuales pueden verse en las imágenes a continuación:



Figura 54. Diferentes piezas ya fabricadas

9.7.6. Resumen parámetros impresión

Una vez obtenidas todas las piezas impresas, pueden consultarse los parámetros más importantes utilizados en cada pieza en la siguiente tabla, así como el tiempo, el peso y el precio de las piezas fabricadas por fabricación aditiva.

<u>Nº</u>	<u>Descripción</u>	<u>Tiempo (h)</u>	<u>Peso (g)</u>	<u>€</u>	<u>Velocidad (mm/s)</u>	<u>Altura de capa (mm)</u>	<u>Relleno (%)</u>	<u>Pared (mm)</u>	<u>EHA (mm)</u>
IBT-01-01-01	Eje primario	14,62	85	1,71	35	0,2	40	1,6	0
IBT-01-01-04	Separador	1,47	7	0,15	35	0,2	25	0,8	0,3
IBT-01-01-02	P1_18T	3,1	16	0,32	40	0,18	35	1,6	0,3
IBT-01-01-03	P2_21T	4,1	22	0,44	40	0,18	35	1,6	0,3
IBT-01-01-06	P3_23T	4,55	26	0,52	40	0,18	35	1,6	0,3
IBT-01-01-07	P4_26T	5,3	32	0,64	40	0,18	35	1,6	0,3
IBT-01-01-08	P5_28T	5,98	37	0,73	40	0,18	35	1,6	0,3
IBT-01-01-09	P6_29T	6,25	39	0,78	40	0,18	35	1,6	0,3
IBT-01-01-05	Arandela	0,45	2	0,05	35	0,2	20	0,8	0,3
IBT-01-02-09	Anillo retención S	0,78	5	0,1	40	0,2	25	1,2	0,2
IBT-01-01-10	Anillo retención P	0,42	2	0,04	35	0,2	25	1,2	0,2
IBT-01-02-01	Eje secundario	15,1	86	1,72	40	0,2	40	1,6	0
IBT-01-02-08	Eje deslizador	5,18	24	0,48	40	0,2	40	1,6	0,3
IBT-01-02-10	Deslizador	4,03	19	0,38	40	0,18	40	1,6	0
IBT-01-02-02	S1_35T	9,35	61	1,21	40	0,18	40	1,6	0,26
IBT-01-02-03	S2_32T	8,15	51	1,01	40	0,18	40	1,6	0,26
IBT-01-02-04	S3_30T	7,37	44	0,89	40	0,18	40	1,6	0,26
IBT-01-02-05	S4_27T	6	36	0,71	40	0,18	40	1,6	0,26
IBT-01-02-06	S5_25T	5,45	30	0,6	40	0,18	40	1,6	0,26
IBT-01-02-07	S6_24T	5,05	27	0,55	40	0,18	40	1,6	0,26
IBT-01-03-02	Horquilla	4,6	23	0,46	38	0,2	30	1,6	0
IBT-01-04-01	1ª carcasa	11,5	125	2,51	50	0,3	25	1,2	0
IBT-01-00-01	Carcasa salida	9,47	96	1,92	45	0,3	25	1,2	0
IBT-01-05-01	Soporte motor	4,05	21	0,45	35	0,2	25	1,6	0
IBT-01-05-02	Acoplamiento	0,8	3	0,05	30	0,18	40	2	0
IBT-01-03-01	Barril selector	12,5	76	1,51	42	0,2	25	1,6	0
IBT-01-04-02	2ª carcasa	9,88	91	1,82	45	0,3	25	1,2	0
IBT-01-04-03	Tapa Electronica	8,2	31	0,63	42	0,2	25	1,2	0
X	Aspas	0,96	5	0,1	35	0,2	25	1,2	0
X	Eje aspas	0,7	3	0,07	35	0,2	25	1,2	-0,18
IBT-01-03-02	Estrella	1,82	11	0,22	40	0,2	25	1,2	0
TOTAL		209,7		25,82					

Tabla 7. Resumen parámetros de impresión

NOTA: No se ha tenido en cuenta el tiempo empleado en imprimir los test de ajustes, piezas falladas o diferentes pruebas de impresión. Algunas piezas grandes como las carcasas han requerido ser impresas varias veces por fallos en la impresora, por lo que se estima que el tiempo total real ha sido en torno a un 30% mayor, unas 270 horas.

9.8. Insertos roscados

A la hora de utilizar roscas en piezas impresas se tienen dos opciones. Se imprime la pieza con el agujero roscado o se postprocesa la pieza y se utilizan insertos de latón, los cuales llevan la

rosca incorporada. La segunda opción ofrece mayor calidad y resistencia a las piezas, por lo que se usarán los insertos roscados de la marca alemana Ruthex.

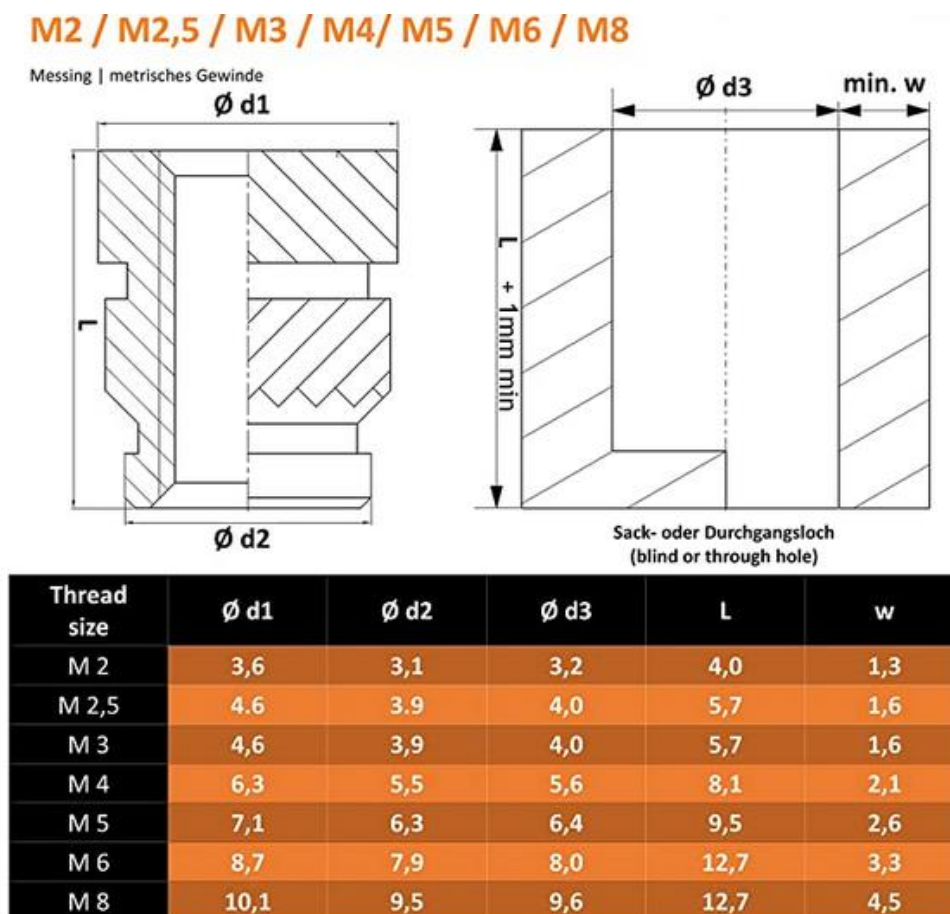


Figura 55. Medidas insertos roscados

El proceso a seguir para la colocación del inserto es el siguiente:

1. Se diseña la pieza con un agujero de diámetro d3 en función de la métrica a utilizar, como puede verse en la figura anterior.
2. Se coloca el inserto en el orificio de la pieza, como puede verse en la siguiente imagen:
3. Se introduce un soldador de estaño a una temperatura superior a la de fusión del material dentro del inserto. Al ser de latón, el calor se va a transmitir rápidamente, calentando el inserto a la temperatura del soldador.
4. Cuando el latón esté caliente, irá fundiendo el plástico e irá descendiendo por el agujero hasta quedar al ras. En ese punto se retira el soldador y se deja enfriar.

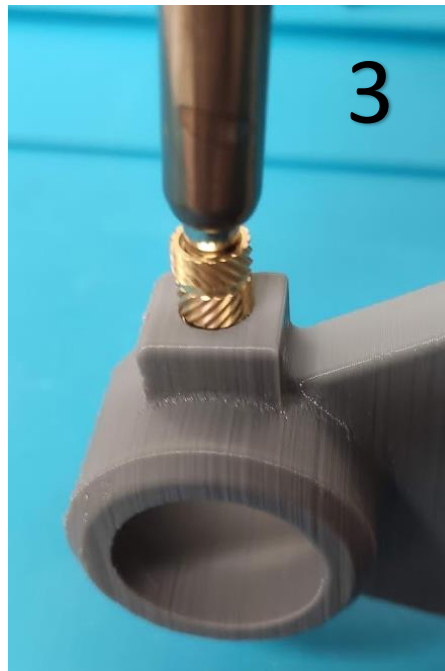
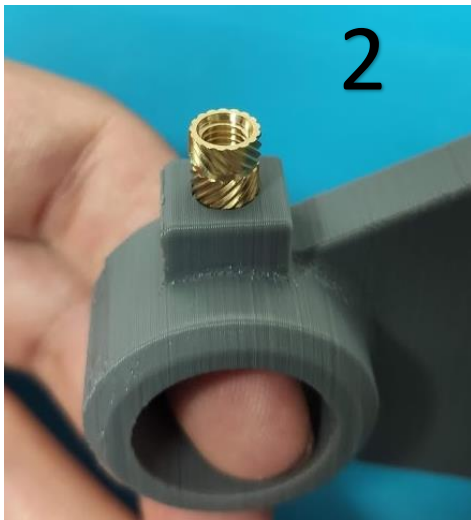


Figura 56. Secuencia instalación insertos roscados de latón

9.9. Componentes mecánicos no impresos

Pese a que prácticamente la totalidad del conjunto está fabricado en PLA con la ayuda de la impresora Ender 3 Pro, el conjunto se complementa de unos pocos elementos comerciales que han sido modificados.

1. La unión de las piezas que lo requieran, se hacen mediante tornillos ISO-4762, tornillos de cabeza hueca hexagonal de diferentes métricas y longitudes, dependiendo de su función, y tuercas hexagonales M8 ISO-4034.
2. Las cuatro varillas roscadas M8 de acero zincado que sujetan y compactan el conjunto se obtienen cortando cuatro segmentos de 220 mm.



Figura 57. Varillas roscadas M8 de 220 mm

3. Un tubo de PVC de 20 mm de diámetro exterior y 196 mm de longitud.

9.10. Electrónica (conexión motor unipolar como bipolar)

Siguiendo las conexiones descritas en el diseño del control del motor, lo único que debe hacerse es realizar las soldaduras de los cables, cubrirlas con funda termo retráctil y realizar el conexionado.

El controlador tiene cuatro entradas para la conexión del motor. Esto es así porque está diseñado para motores bipolares (2 hilos por fase) que disponen de 4 cables. La unidad de la que se dispone es un motor unipolar (3 hilos por fase) de 6 cables, por lo que es necesario realizar la conexión del motor como si fuera bipolar.

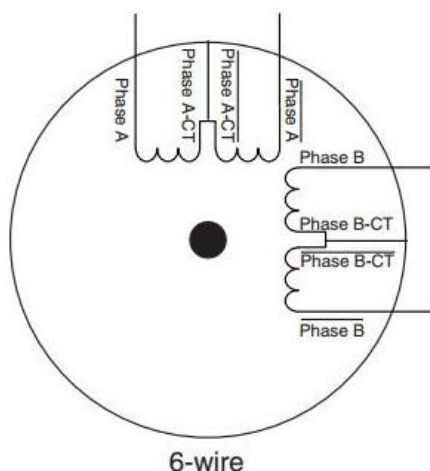


Figura 58. Conexión de un motor unipolar como bipolar

Para ello lo que se hará será determinar los 4 cables que corresponden a las fases A, A', B y B' y se usarán como si fueran los 4 cables de un motor bipolar, dejando los otros dos al aire. Se sigue el siguiente proceso:

- Con ayuda de un multímetro se mide la resistencia de cada uno de los cables con el resto. Los 3 cables que muestren un valor de resistencia, serán los cables unidos a la misma bobina.
- Entre estos 3 cables que corresponden a la misma bobina, se busca los dos cables que muestran un mayor valor de resistencia entre sí. Éstos serán los dos cables a usar de una bobina.
- Tras realizar el proceso con las dos bobinas, se tendrán dos cables que no se realizará conexión alguna, y dos parejas de cables que se llevarán al controlador a las entradas A y B (no tienen polaridad, lo único que cambiará si se invierte el orden de conexionado será el sentido de giro del motor).

Tras medir los valores de resistencia se obtiene que los cables correspondientes a cada bobina que se llevarán al controlador son:

A	B
Azul y rojo	Verde y negro

10. PRESUPUESTO

El presupuesto total del proyecto se va a desglosar en tres fuentes distintas. Por un lado el coste relacionado con el realizador del proyecto, por otro lado el coste asociado a la compra de materiales, y finalmente el coste intrínseco a la fabricación mediante impresión 3D.

10.1. Realización del proyecto

	CONCEPTO	HORAS MANO DE OBRA	€/h	TOTAL
Realización del proyecto	Adquisición de conocimientos previos	70	5	350
	Diseño	200	30	6000
	Elaboración documentación técnica	40	20	800
	Apoyo a la fabricación	50	15	750
	Subtotal (€)			7900

Por adquisición de conocimientos previos se entiende manejo y funcionamiento de la impresora, del laminador etc. En el caso de apoyo a la fabricación, arreglar averías de la impresora, montaje y pruebas del prototipo etc.

10.2. Elementos comerciales

Por otro lado, existe el coste asociado al material, en éste caso comercial, de elementos que han sido comprados.

Elementos comerciales	Cantidad	€/unidad	Total/elemento
Nema 17	1	17,9	17,9
Interruptor	1	2,65	2,65
EasyDriver	1	12,9	12,9
Arduino Uno	1	22,8	22,8
HK3512	6	5,45	32,7
6804 RS	4	4,84	19,36
Tuercas M8	16	0,14	2,24
Tornillería	25	0,05	1,25
Varilla M8	1	0,65	0,65
Transformador 12V	1	7,9	7,9
Creality Ender 3 Pro	1	189	189
Insertos latón	25	0,14	3,5
Subtotal (€)			312,85

10.3. Impresión 3D

Por último, existe el coste asociado a la fabricación de las piezas impresas, tanto en material como en electricidad.

Coste fabricación	€
Piezas impresas	25,82
Electricidad	7,5
Subtotal (€)	33,32

NOTA:

Para el coste de piezas impresas se ha calculado teniendo en cuenta un precio estándar de PLA de 20 €/kg. Los pesos de cada pieza pueden consultarse en la Tabla 7.

En el caso del coste de electricidad se ha estimado un consumo medio de 360W a lo largo de las casi 210 horas de impresión y un precio medio de 0.099 €/kWh típico de horas durante el día.

10.4. Coste total

Juntando los costes de cada una de las partes, se obtiene que el precio total del proyecto asciende a 9978 euros.

CAPÍTULO	IMPORTE (€)
REALIZACIÓN DEL PROYECTO	7900
MATERIALES	346,17
Subtotal (€)	8246,17
I.V.A (21%)	1731,7
TOTAL (€)	9978

11.CONCLUSIONES

Para concluir el presente proyecto, se realizará una pequeña reflexión sobre la consecución de los objetivos principales del mismo.

Partiendo de 3 bobinas de PLA, se ha logrado con relativamente poco desembolso económico y mucho esfuerzo desarrollar una transmisión secuencial, completamente funcional con una gran similitud, tanto en piezas como en montaje, a las que se pueden usar en categorías reina de la ingeniería, como puede ser la Formula 1. Sin embargo otros objetivos secundarios no se han logrado de la manera que al autor del proyecto le hubiera gustado.

La impresión 3D ha avanzado muchísimo en los últimos años y se ha convertido en una potentísima herramienta de fabricación, sobre todo si se tiene la capacidad técnica de utilizar materiales más avanzados como Nylon, fibras de carbono, polipropileno etc, e impresoras con tecnologías y mecánicas más avanzadas. Éste no era el caso del proyecto por lo que pese a haber tenido una tasa de éxito bastante elevada, así como una buena calidad final de las piezas fabricadas, ciertas flaquezas han salido a la luz. Los ajustes plástico/plástico, pese al uso de grasas y lubricantes, resultan complicados para piezas que deslicen unas sobre otras. El uso de materiales con baja fricción como el nylon hubiera permitido ajustes más finos, con buen deslizamiento, y se hubiera ahorrado tiempo de impresión y pruebas de funcionamiento, que se podría haber invertido en otras áreas del proyecto.

En cualquier caso, se parte de una muy buena base, con los objetivos principales conseguidos. Se tiene una caja de cambios funcional, prácticamente impresa en 3D en su totalidad, sobre la que trabajar para en un futuro integrar sistemas que ayuden a la comprensión del alumno, como podría ser un sensor de velocidad, un display digital que muestre la marcha engranada, un accionamiento del cambio más real, como por ejemplo con levas, o una palanca, etc.

En definitiva, el desarrollar un producto desde que simplemente es una idea en la cabeza, hasta su materialización física, ha supuesto un reto apasionante que con suerte podrá ser utilizado para docencia en áreas de mecánica, prototipado rápido y demás sectores de la ingeniería.

Pamplona, 22 de Octubre de 2020



Fdo: Íñigo Blanco Toni

12. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Mijael08, «Thingiverse,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:3726483> [Último acceso: octubre 2020].
- [2] Jesús Félez Mindán y M^a Luisa Martínez Muneta, *“Ingeniería gráfica y diseño”*, M.36.658.-2008.
- [3] Manuel Arias-Paz Guitian, *“Manual de automóviles”*, 2004.
- [4] Richard G.Budynas y J. Keith Nisbett, *“Diseño en ingeniería mecánica de Shigley”*, octava edición.
- [5] <Ni>, [En línea], Available: <https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z0000019LWZSA2&l=es-ES> [último acceso: Octubre 2020].
- [6] <Robots didácticos>, [en línea]. Available at: <http://robots-argentina.com.ar/didactica/easydriver-controladora-de-motor-paso-a-paso-con-modos-de-micropaso/>

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Diseño y prototipado de una caja de cambios secuencial



Grado en Ingeniería
en Tecnologías Industriales

Anexos

Autor: Íñigo Blanco Toni

Directora: Sara Marcelino Sádaba

Pamplona, 22 de octubre de 2020

ÍNDICE ANEXOS

1. MANUAL DE MONTAJE..... 3

2. PLANOS 15

3. FICHAS TÉCNICAS 17

1. MANUAL DE MONTAJE

Todas las piezas a utilizar, sin tener en cuenta la electrónica se pueden ver a continuación:



Figura 1. Piezas a utilizar en el montaje

El montaje, de igual manera que se han estructurado los planos, se realizará mediante subensamblajes, para unirlos posteriormente formando el conjunto final. La referencia de las piezas puede consultarse en los planos de fabricación, o en el proceso de diseño en la memoria.

1. Se ensambla el conjunto del eje primario (IBT-01-01-00)

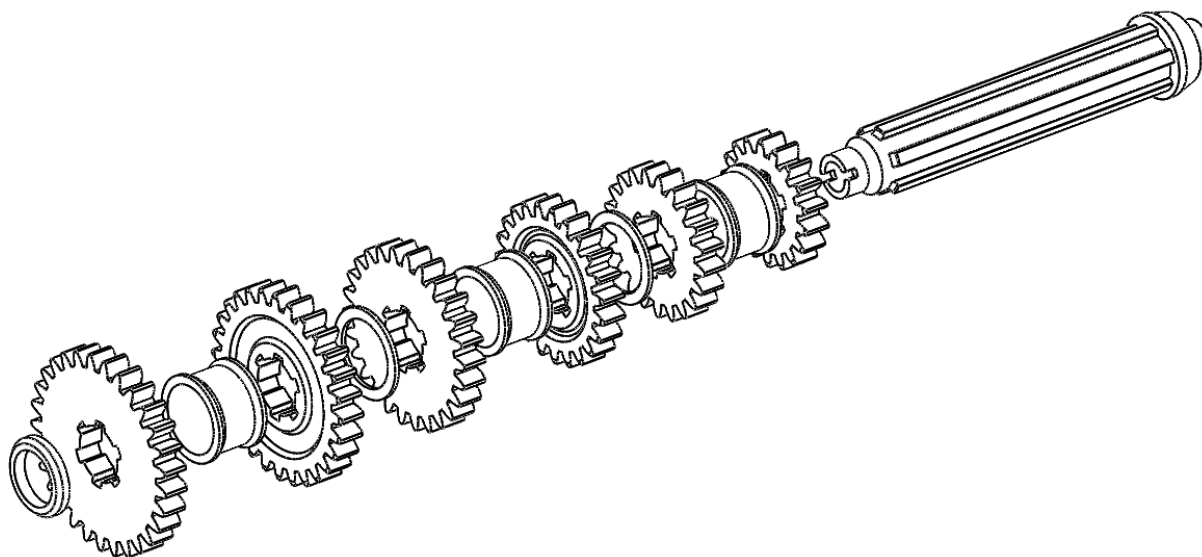


Figura 2. Secuencia de montaje subensamblaje IBT-01-01-00

Sobre el eje primario (IBT-01-01-01) se van montando los engranajes, las arandelas y los espaciadores en la secuencia de la *Figura 2*. Es fundamental que las ruedas dentadas estén en orden (se introducen de menor a mayor número de dientes) y que las caras planas de los engranajes estén siempre mirando unas con otras. Por último se compacta el conjunto instalando el anillo de retención (IBT-01-01-10), quedando de la siguiente manera:

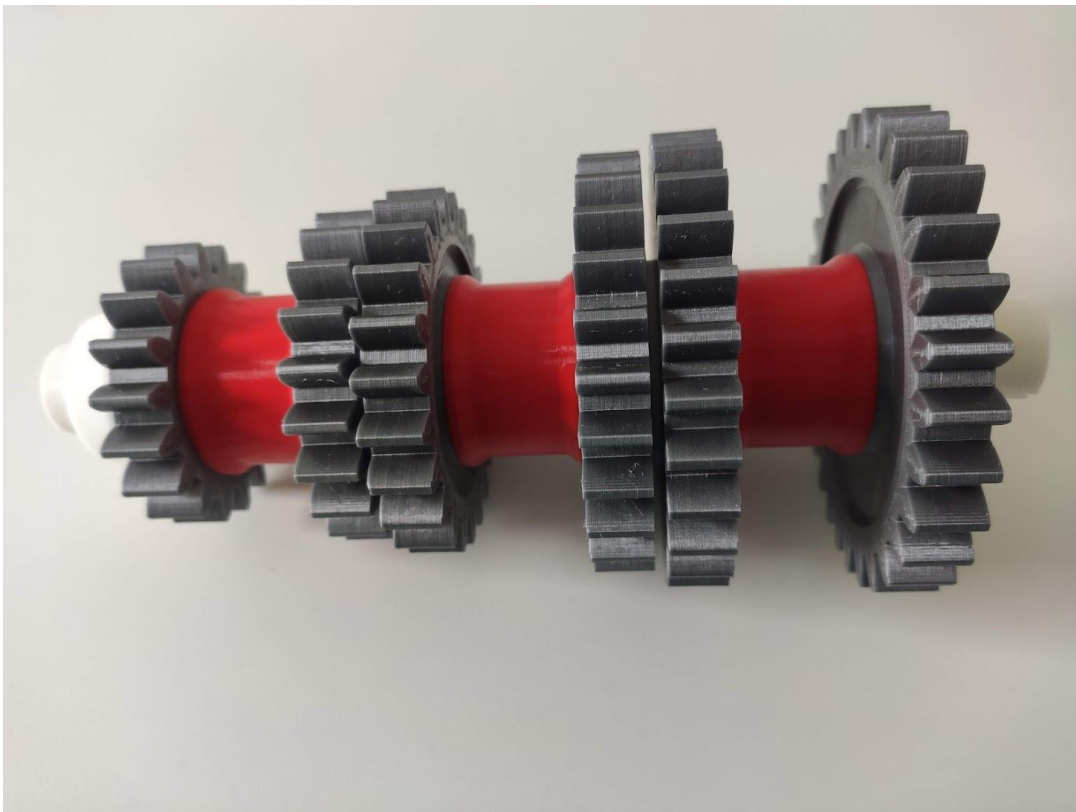
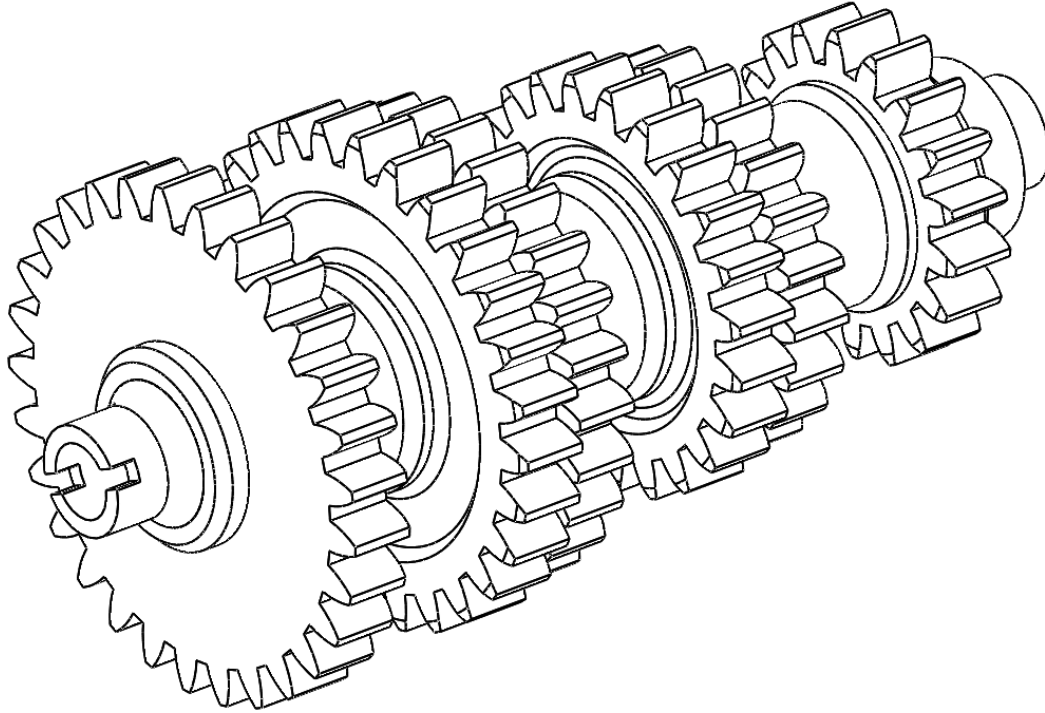


Figura 3. Subensamblaje IBT-01-01-00 montado

This diagram illustrates the exploded view of a gearbox assembly. It shows a series of components including input and output shafts, intermediate shafts, gears of various sizes, bearings, and seals. The components are arranged in a linear sequence, showing their relative positions and how they fit together. The input shaft is on the left, followed by a series of gears and shafts, and the output shaft is on the right. The diagram is a technical drawing with clear lines and labels.



Íñigo Blanco Toni

Por último sólo queda introducir los pares de marchas, separados por arandelas, y compactar el conjunto con otro anillo de retención (IBT-01-02-09). De nuevo cerciorarse de que el orden de las marchas es correcto, introduciéndose de menor a mayor número de dientes nuevamente.

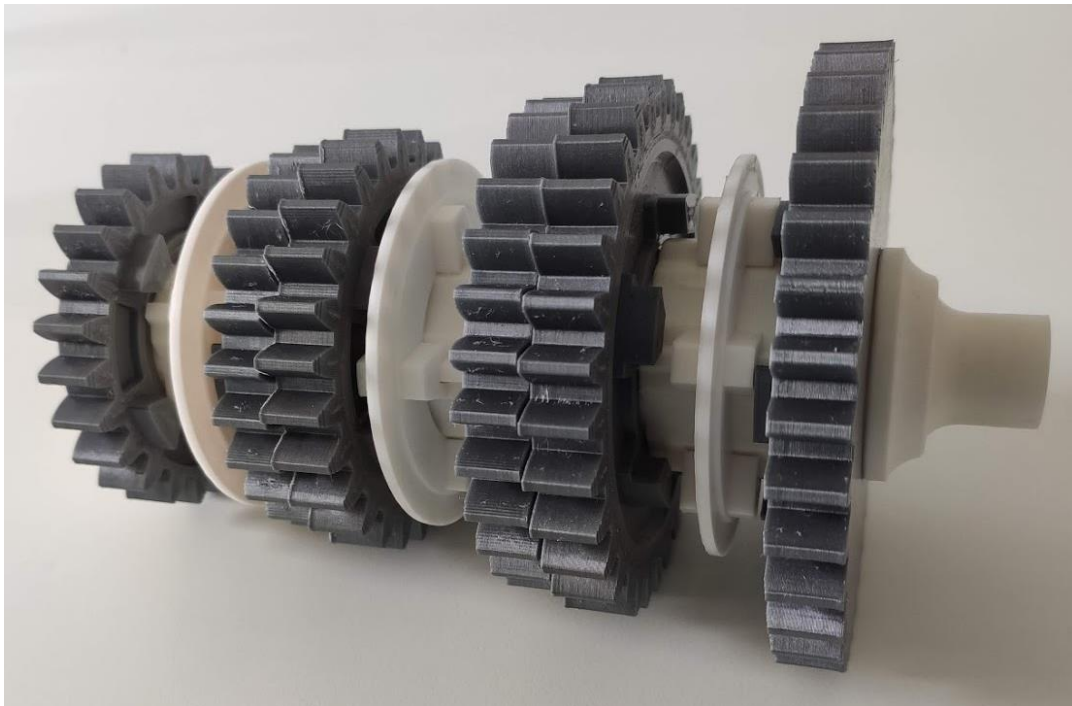
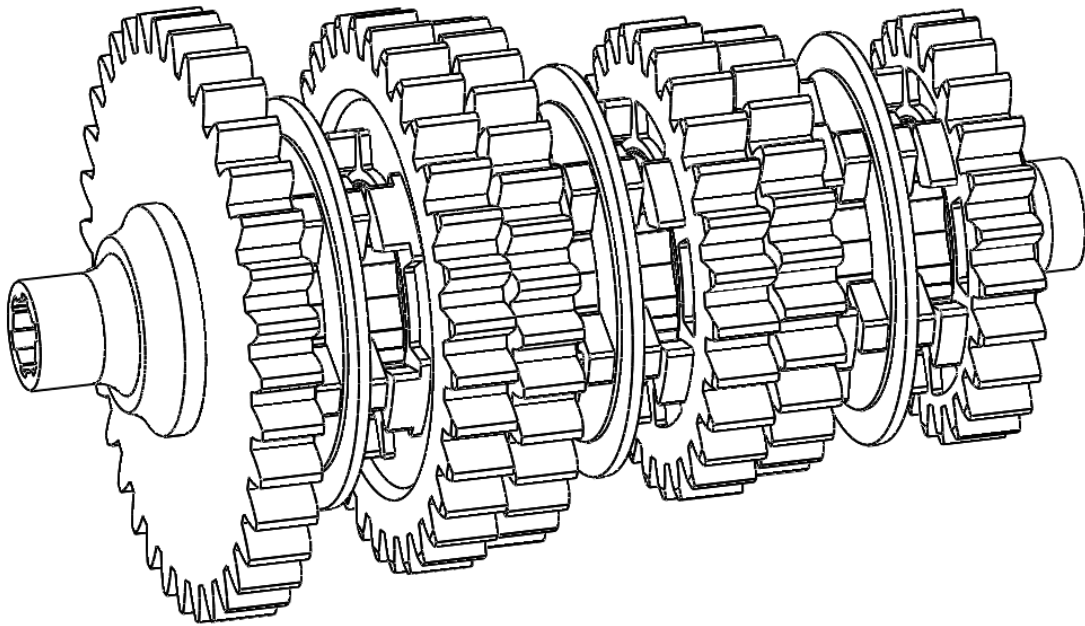


Figura 6. Subensamblaje IBT-01-02-00 ya montado

3. Se ensambla el conjunto carcasa (IBT-01-04-00)

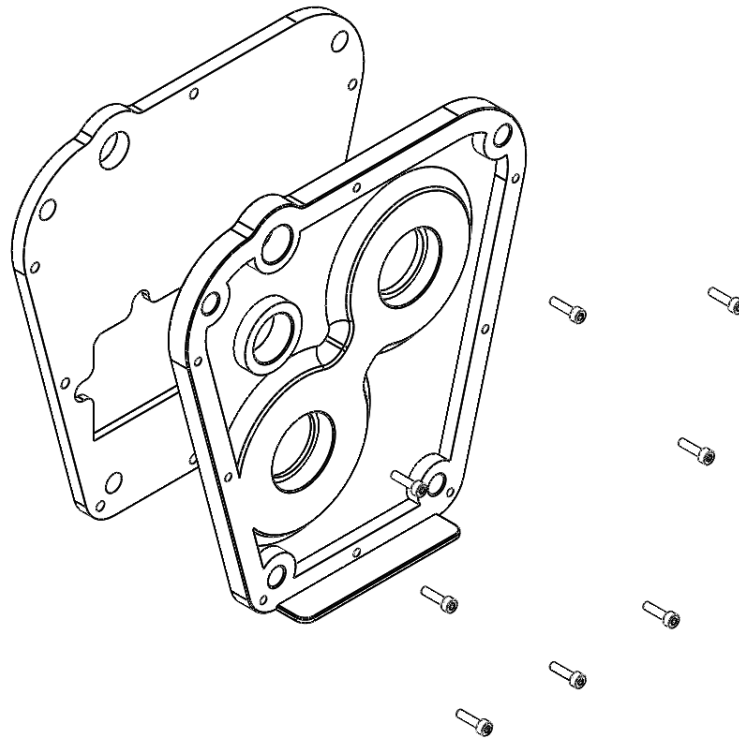


Figura 7. Piezas necesarias para ensamblar la carcasa

Se unen las dos carcasas (IBT-01-04-01 e IBT-01-04-02) mediante 8 tornillos ISO-4726 M3x12 y se colocan los dos rodamientos SKF 61804 en sus dos alojamientos. Por último se insertan las cuatro varillas roscadas de acero zincado M8, fijándolas con dos tuercas por varilla.



Figura 8. Carcasa ensamblada

4. Colocación de los ejes en sus alojamientos

Con la carcasa apoyada sobre una superficie plana y estable, se inserta el conjunto primario montado en el primer paso en el agujero del rodamiento inferior. Importante introducirlo de manera que la rueda dentada más grande quede el más próximo a la carcasa.

Una vez colocado el eje primario, se introduce el conjunto secundario montado en el segundo paso en el alojamiento del segundo rodamiento. Ésta vez será el engranaje más pequeño el que debe quedar más próximo a la carcasa. Si se han realizado los pasos previos correctamente, las ruedas de ambos ejes deberían ya engranar perfectamente.

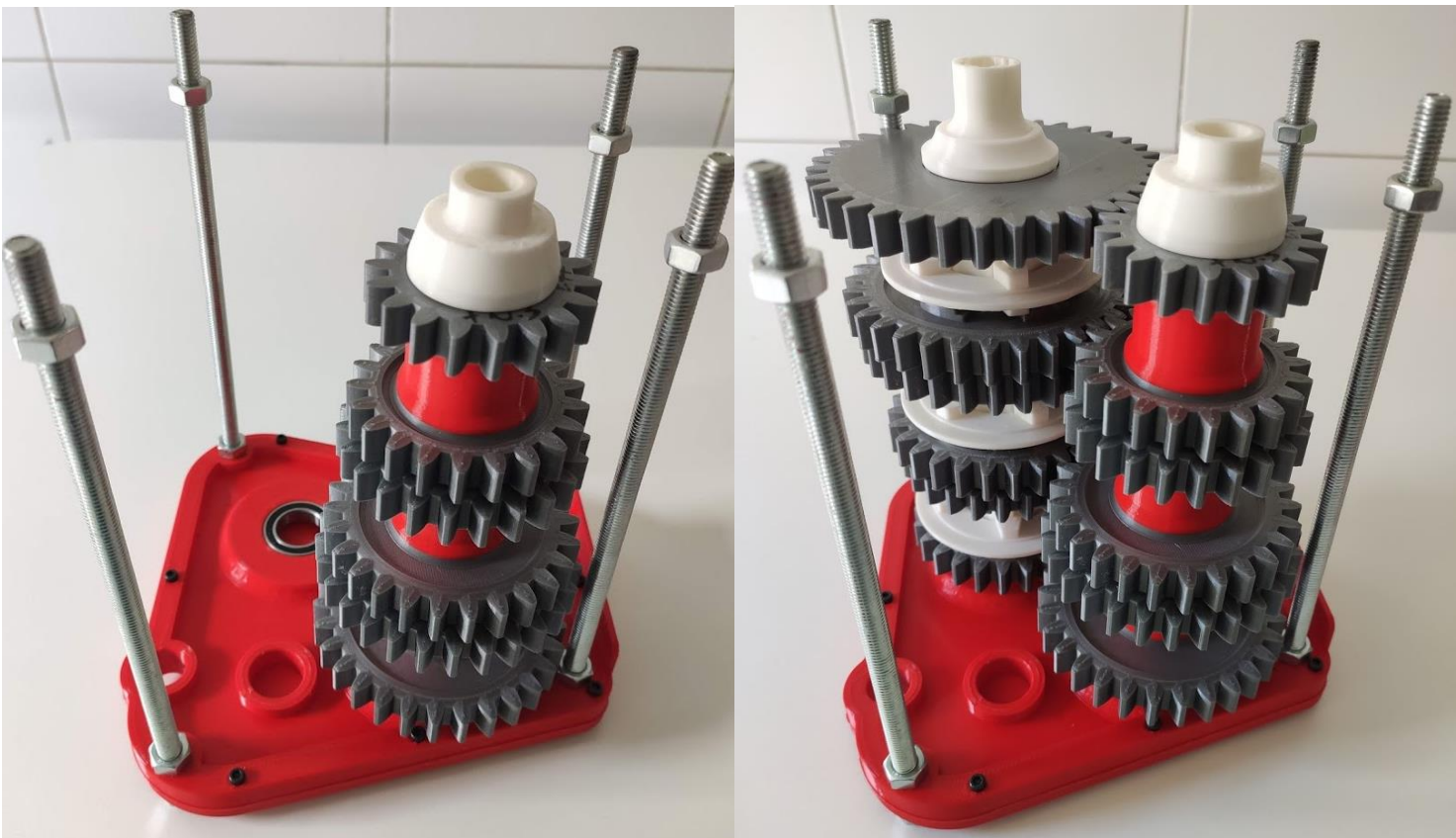


Figura 9. A la izquierda, montaje de eje primario. A la derecha, tras añadir el secundario

NOTA:

Importante respetar el orden de colocación de los ejes, puesto que si se introduce primero el secundario puede haber interferencias de montaje al introducir el primario. Se recomienda comprobar que los ejes giran libremente y cada par de engranajes están correctamente engranados entre sí.

5. Montaje de las horquillas (IBT-01-03-02) en los deslizadores (IBT-01-02-10)

En éste paso, se han de colocar las tres horquillas con las caras planas hacia abajo y con los tornillos ISO-4762 M5x8 ya instalados en cada una. Basta con introducir cada uno de los deslizadores en la ranura de la horquilla y tener en cuenta la orientación de la horquilla, si no habrá interferencia de funcionamiento.

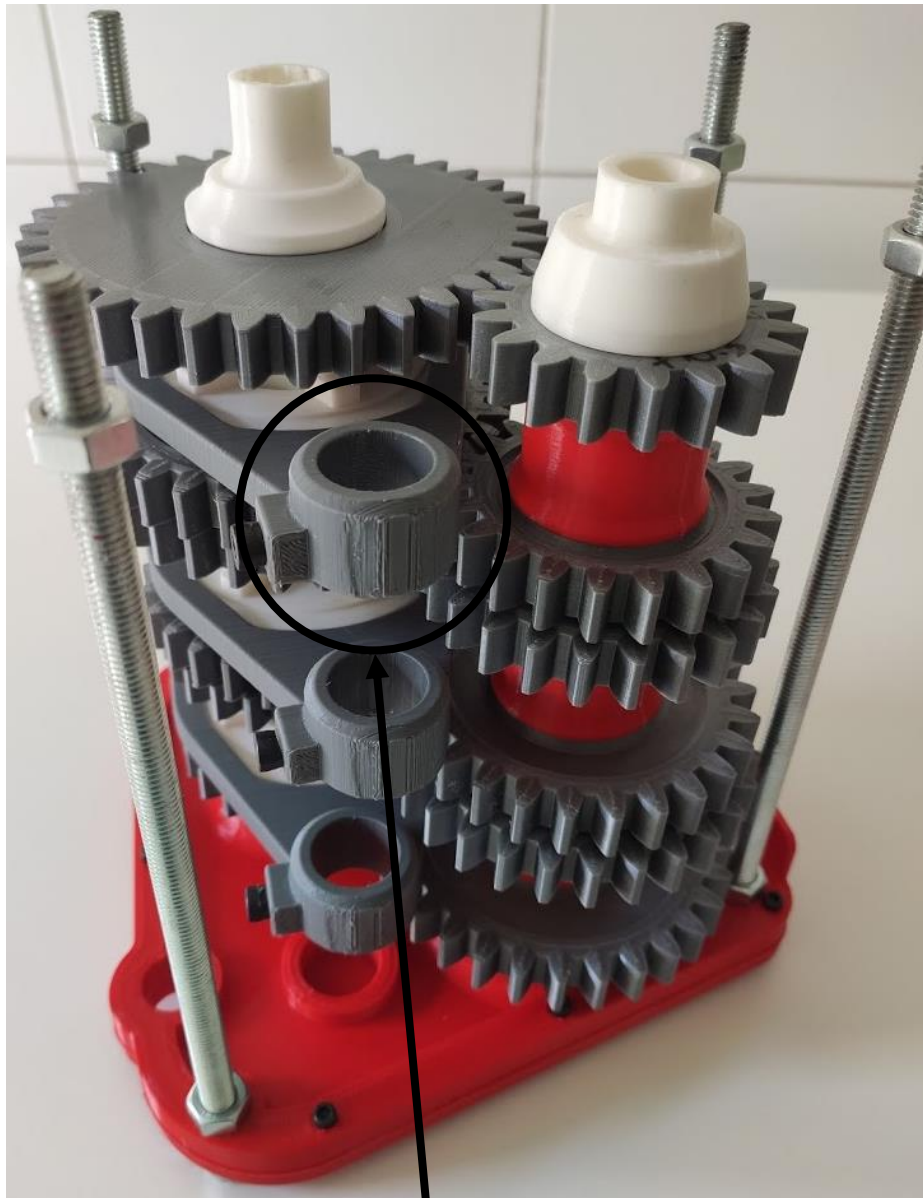


Figura 10. Montaje horquillas

La horquilla debe quedar así, ¡con la cara plana hacia abajo!

6. Montaje del barril selector (IBT-01-06-01)

Se introduce la parte más larga del barril selector (zona donde se encuentra la rosca) en el único agujero pasante restante de la carcasa. Se recomienda engrasar previamente el agujero, o el eje.

A continuación, se colocará el barril de manera que el deslizador de más arriba (1ª y 2ª marcha) esté engranando 2ª. Es decir, la cabeza del tornillo de la horquilla inferior e intermedia deberá estar en posición neutra y el de la horquilla superior en la posición más baja de su trayectoria, como se muestra a continuación.

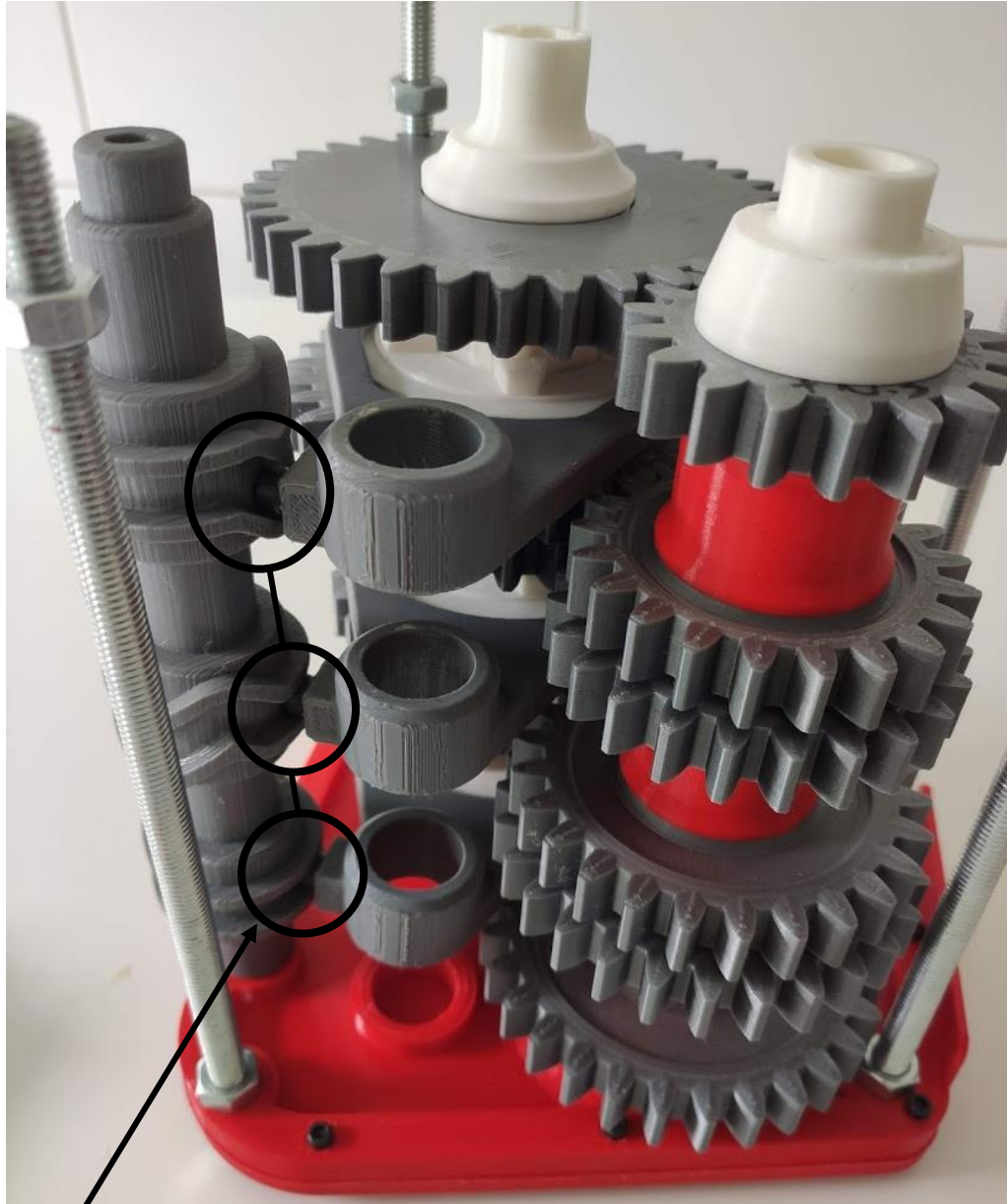


Figura 11. Montaje barril selector y posición de las horquillas

Horquillas inferiores en posición neutra, con el seguidor sobre las caras paralelas de la leva cilíndrica, y la horquilla superior en su posición más baja, engranando 2ª marcha.

7. Montaje tubo PVC (IBT-01-03-01) y soporte de salida (IBT-01-00-01)

Una vez colocadas las horquillas en su posición, engrasamos e introducimos el tubo de PVC, y cerramos el conjunto montando el soporte de salida y fijándolo con las cuatro tuercas restantes:



Figura 12. Montaje del tubo (izda) y soporte de salida (dcha)

8. Montaje de la estrella (IBT-01-06-02)

En éste paso simplemente se ha de colocar la estrella de manera que el número 2 esté alineado con la flecha de la carcasa, puesto que se ha montado el barril selector engranando la segunda marcha, y se atornilla usando el tornillo ISO-4762 M5x12.



Figura 13. Fijación de la estrella en 2ª marcha

9. Montaje del motor (IBT-01-05-00)

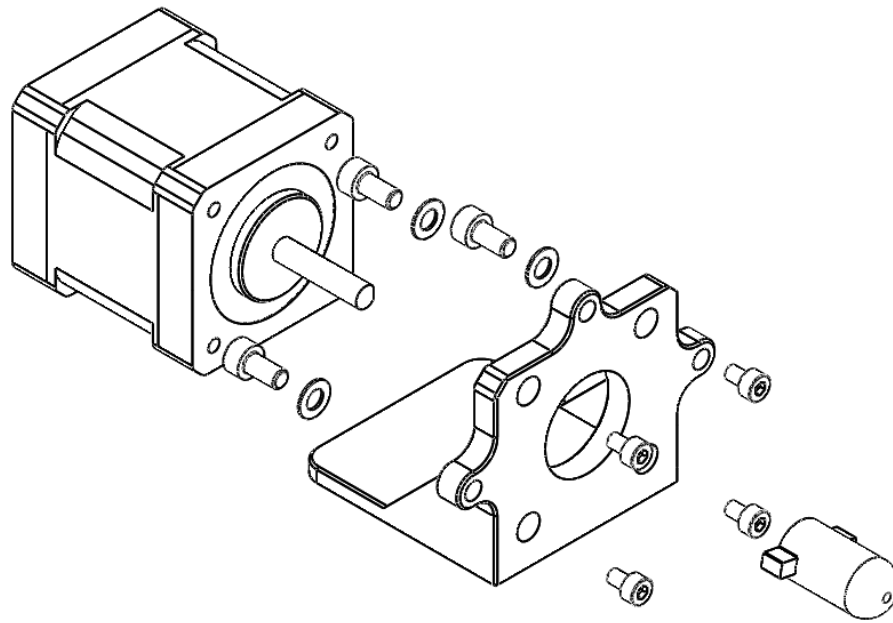


Figura 14. Despiece subensamblaje motor

Primero se ancla el motor a su soporte (IBT-01-05-01) mediante 4 tornillos ISO-4762 M3x5 y se introduce el acople (IBT-01-05-02) que transmite la potencia del motor al eje primario en el eje del motor. Una vez hecho esto, se monta el motor en la carcasa mediante cuatro tornillos ISO-4762 M4x8 y cuatro arandelas ISO-7092-4. Para poder acoplar el motor con el eje primario, las pestañas del acople deben entrar en la ranura del eje.

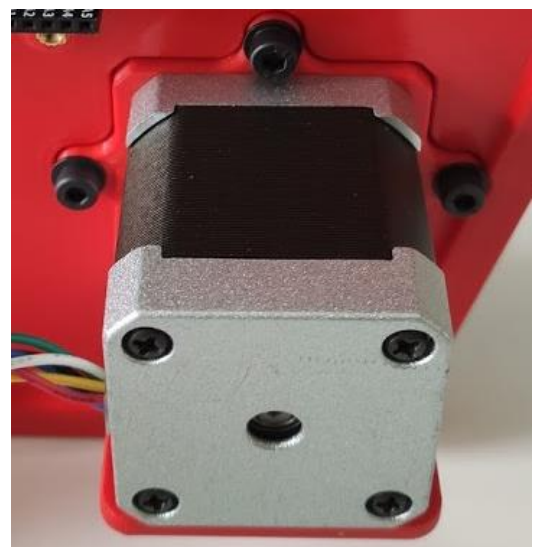
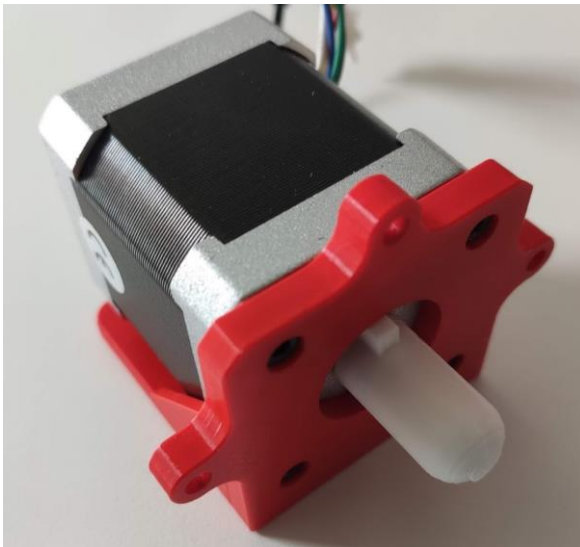


Figura 15. A la izquierda, montaje del motor en su soporte. A la derecha, unión del motor al conjunto

10. Montaje de la electrónica

Utilizando 4 tornillos ISO-4762 M3x6 se une el módulo Arduino, con todas las conexiones previamente realizadas y se cubre con la tapa de la electrónica (IBT-01-04-03), atornillándola con otros 4 ISO-4762 M3x6.

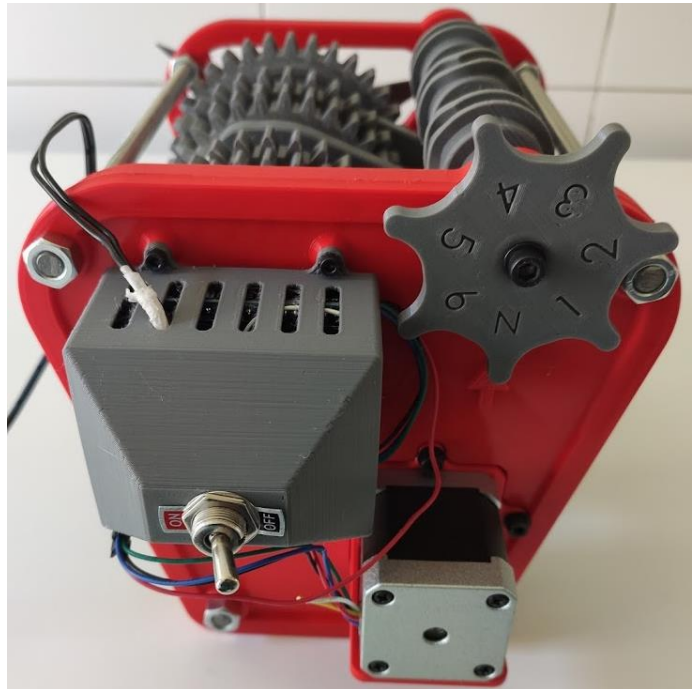
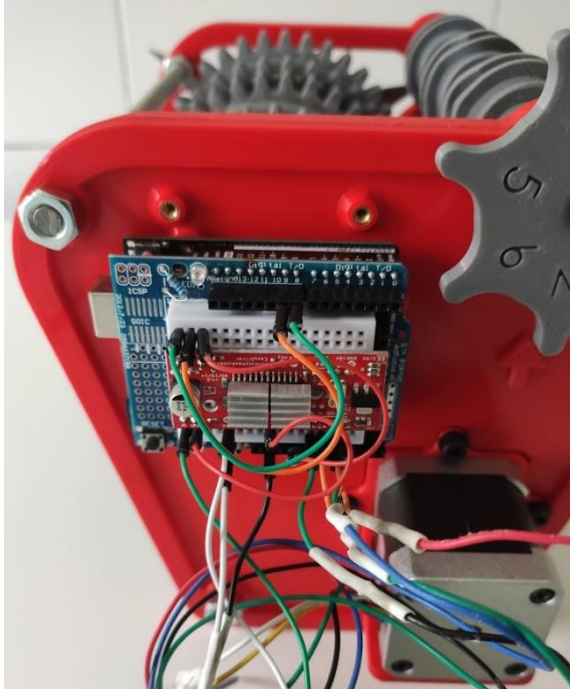


Figura 16. Montaje electrónica

11. Montaje de la hélice

Para visualizar el movimiento del eje secundario, se introduce la hélice en el agujero nervado del eje de salida. Con ello el montaje ha finalizado.

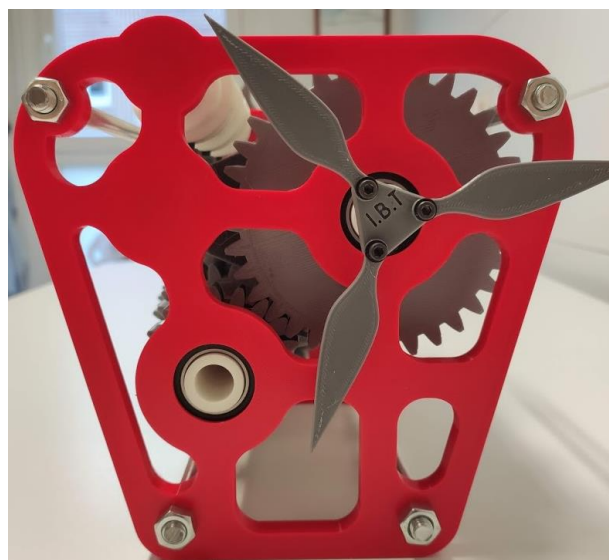


Figura 17. Fin del montaje

2. PLANOS

Plano 1: IBT-01-00-00

Plano 2: IBT-01-01-00 (explosionado)

Plano 3: IBT-01-01-00 (sección)

Plano 4: IBT-01-01-00 (ruedas dentadas)

Plano 5: IBT-01-01-01

Plano 6: IBT-01-01-04

Plano 7: IBT-01-01-10

Plano 8: IBT-01-02-00 (explosionado)

Plano 9: IBT-01-02-00 (sección)

Plano 10: IBT-01-02-00 (ruedas dentadas)

Plano 11: IBT-01-02-01

Plano 12: IBT-01-02-08

Plano 13: IBT-01-02-09

Plano 14: IBT-01-02-10

Plano 15: IBT-01-03-00

Plano 16: IBT-01-03-01

Plano 17: IBT-01-03-02

Plano 18: IBT-01-04-00

Plano 19: IBT-01-04-01

Plano 20: IBT-01-04-02

Plano 21: IBT-01-05-00

Plano 22: IBT-01-05-01

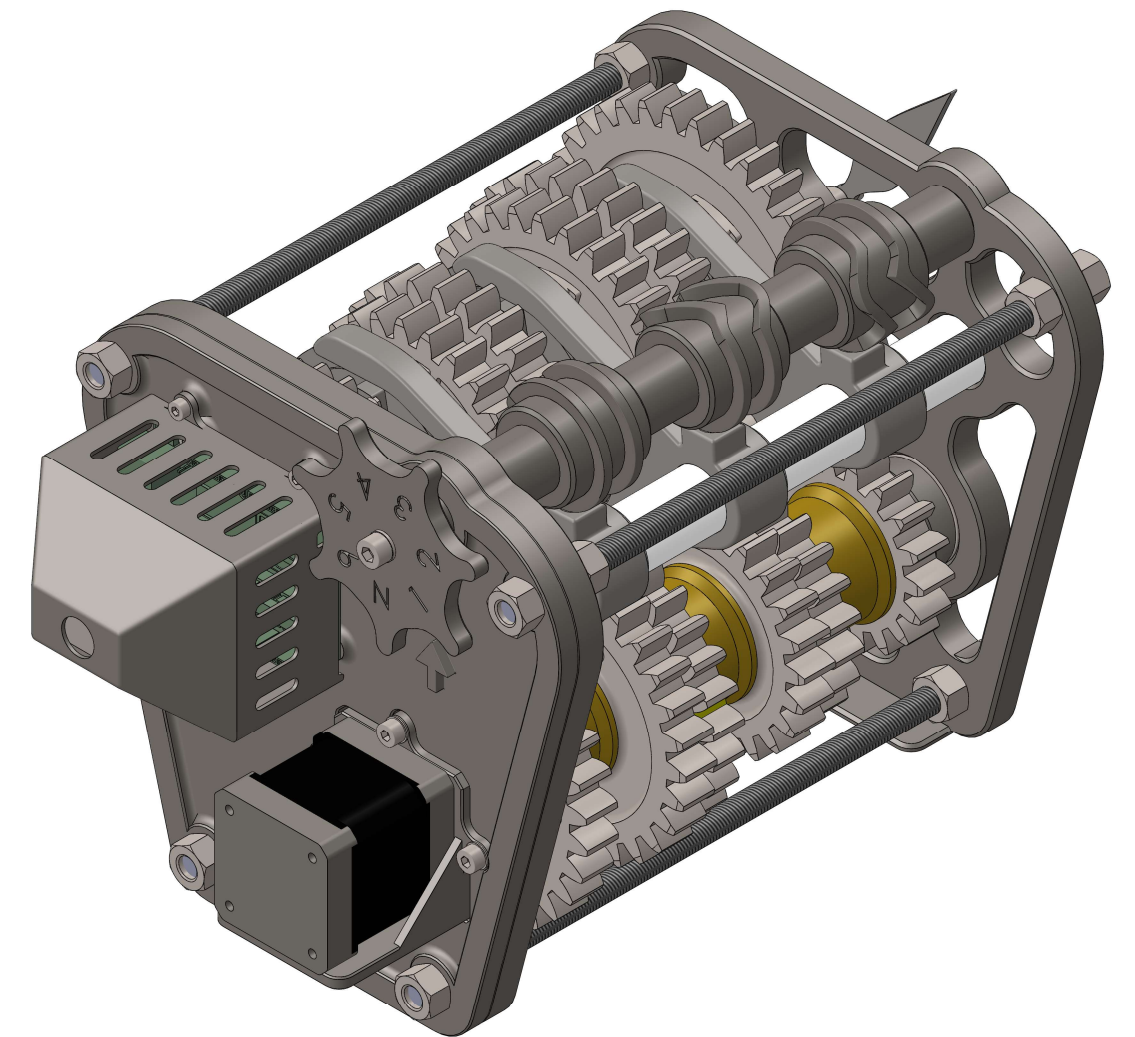
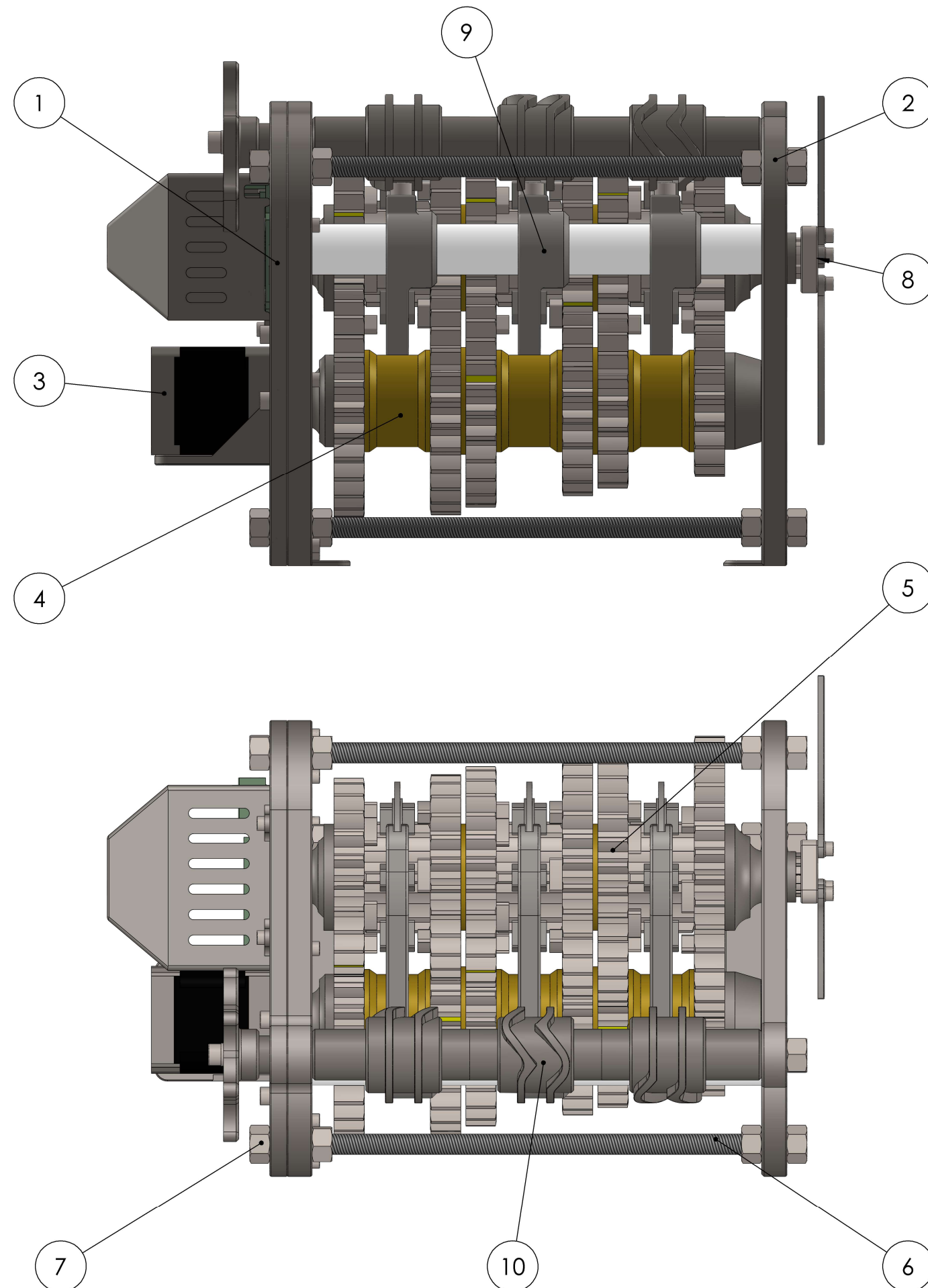
Plano 23: IBT-01-05-02

Plano 24: IBT-01-06-00

Plano 25: IBT-01-06-01

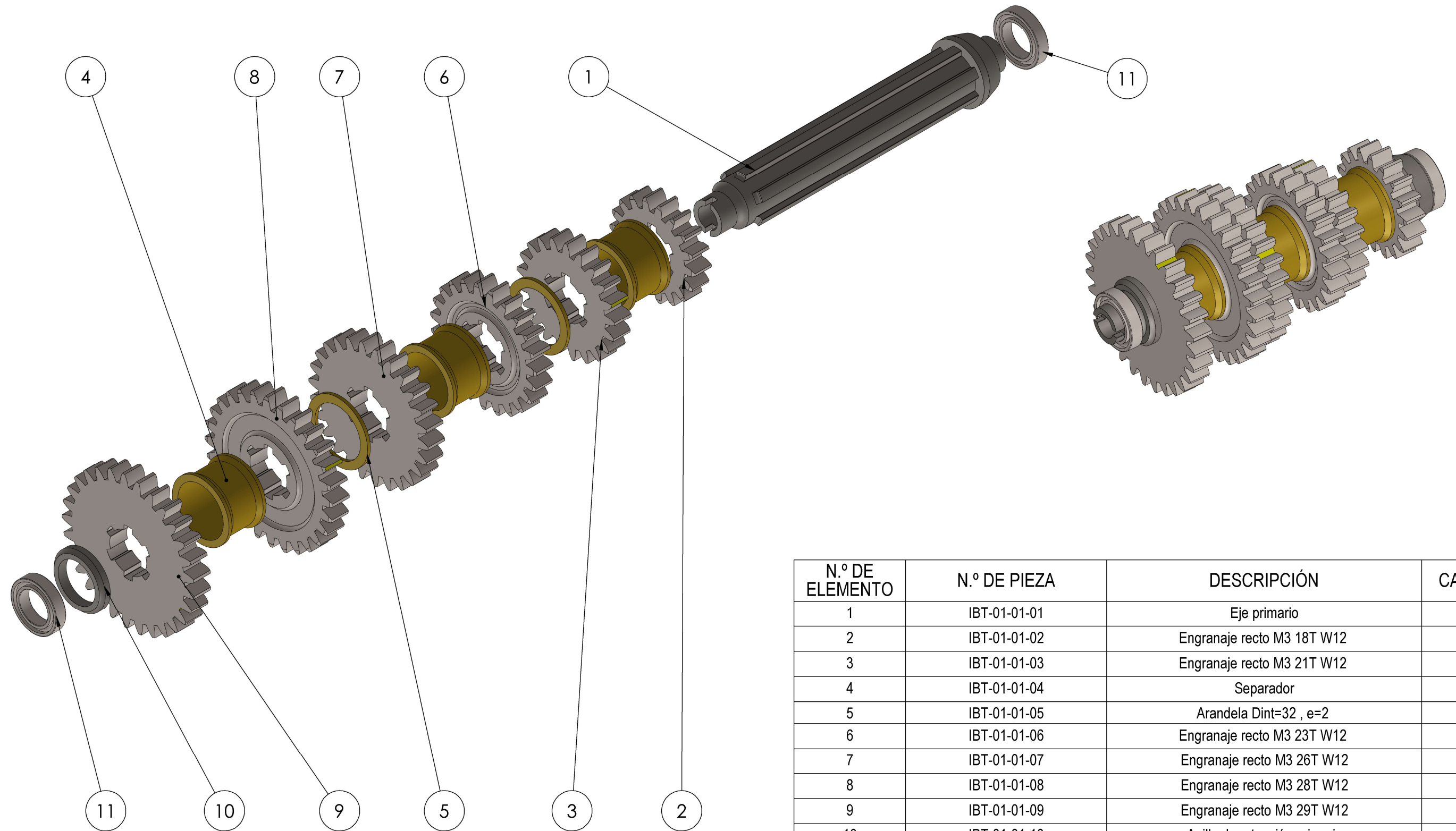
Plano 26: IBT-01-06-02

Plano 27: IBT-01-00-00



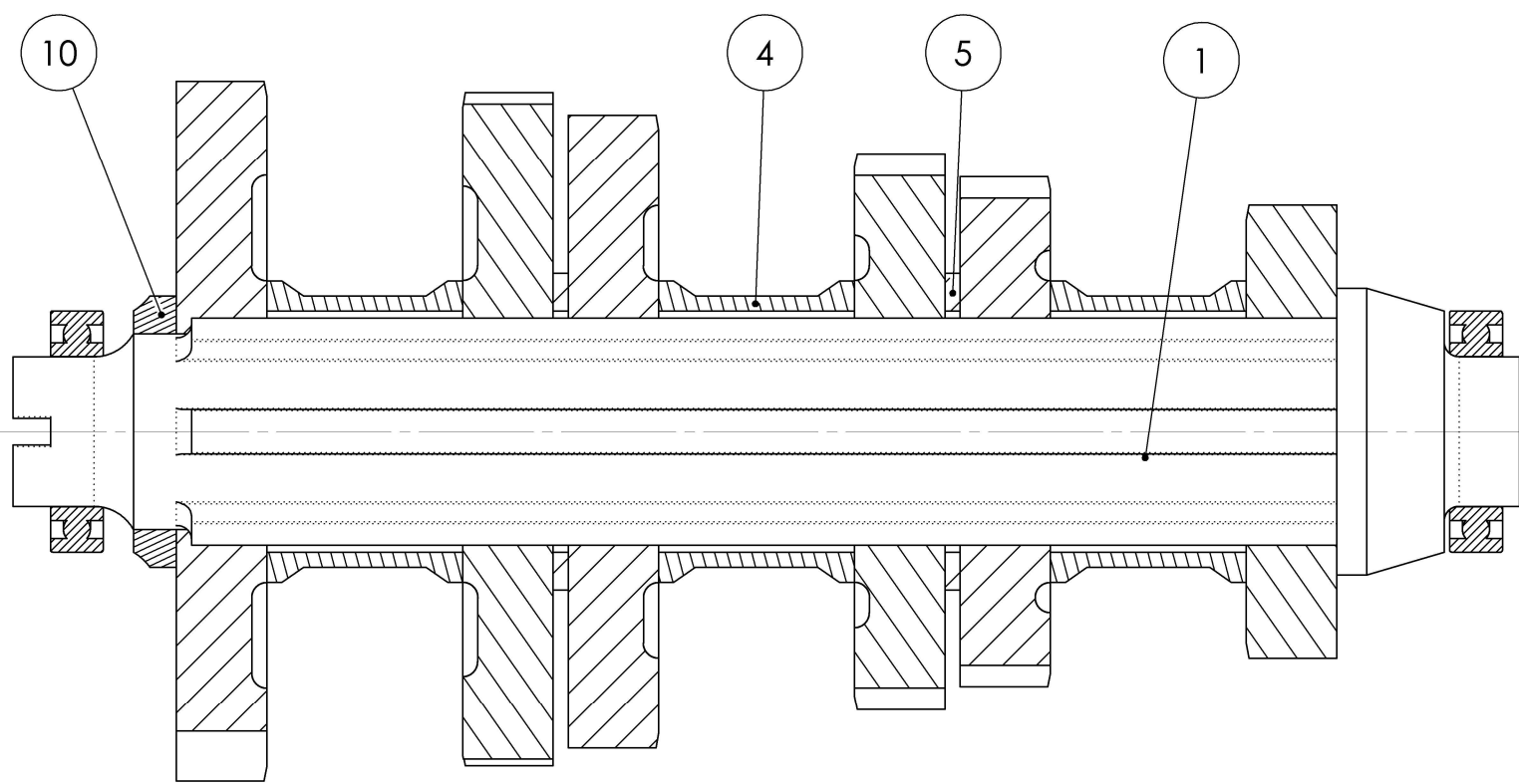
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	IBT-01-04-01	Ensamblaje carcasa	1
2	IBT-01-00-01	Soporte salida	1
3	IBT-01-05-00	Ensamblaje motor	1
4	IBT-01-01-00	Ensamblaje eje primario	1
5	IBT-01-02-00	Ensamblaje eje secundario	1
6	IBT-01-00-02	Varilla roscada M8x220	4
7	ISO - 4034 - M8 - N	Tuerca hexagonal M8	16
8	IBT-01-07-00	Ensamblaje hélice	1
9	IBT-01-03-00	Ensamblaje horquillas selectoras	1
10	IBT-01-06-00	Ensamblaje tambor selector	1

DIBUJADO	FECHA	PROYECTO	ESPECIFICACIONES GENERALES	
	20/10/2020		MATAR ARISTAS	0.5X45°
APROBADO		DENOMINACIÓN	UNIDADES	mm
			NOMBRE	ÍÑIGO BLANCO TONI
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL	PLA, PVC, Acero	
E.T.S.I.I.T		PESO (Kg)	2.16	
upna		PLANO Nº	IBT-01-00-00	
				A3 <div>ESCALA</div> 1:2

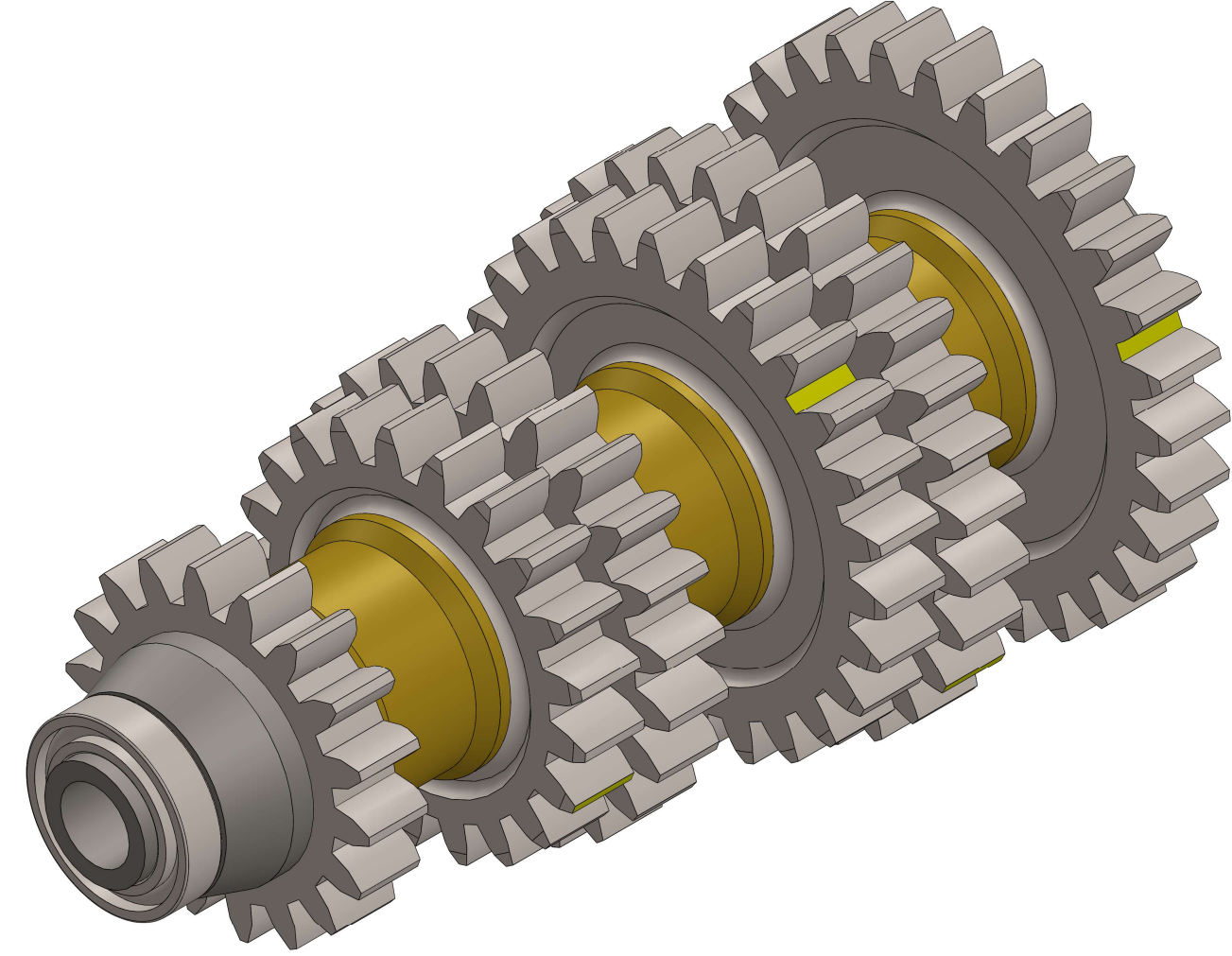


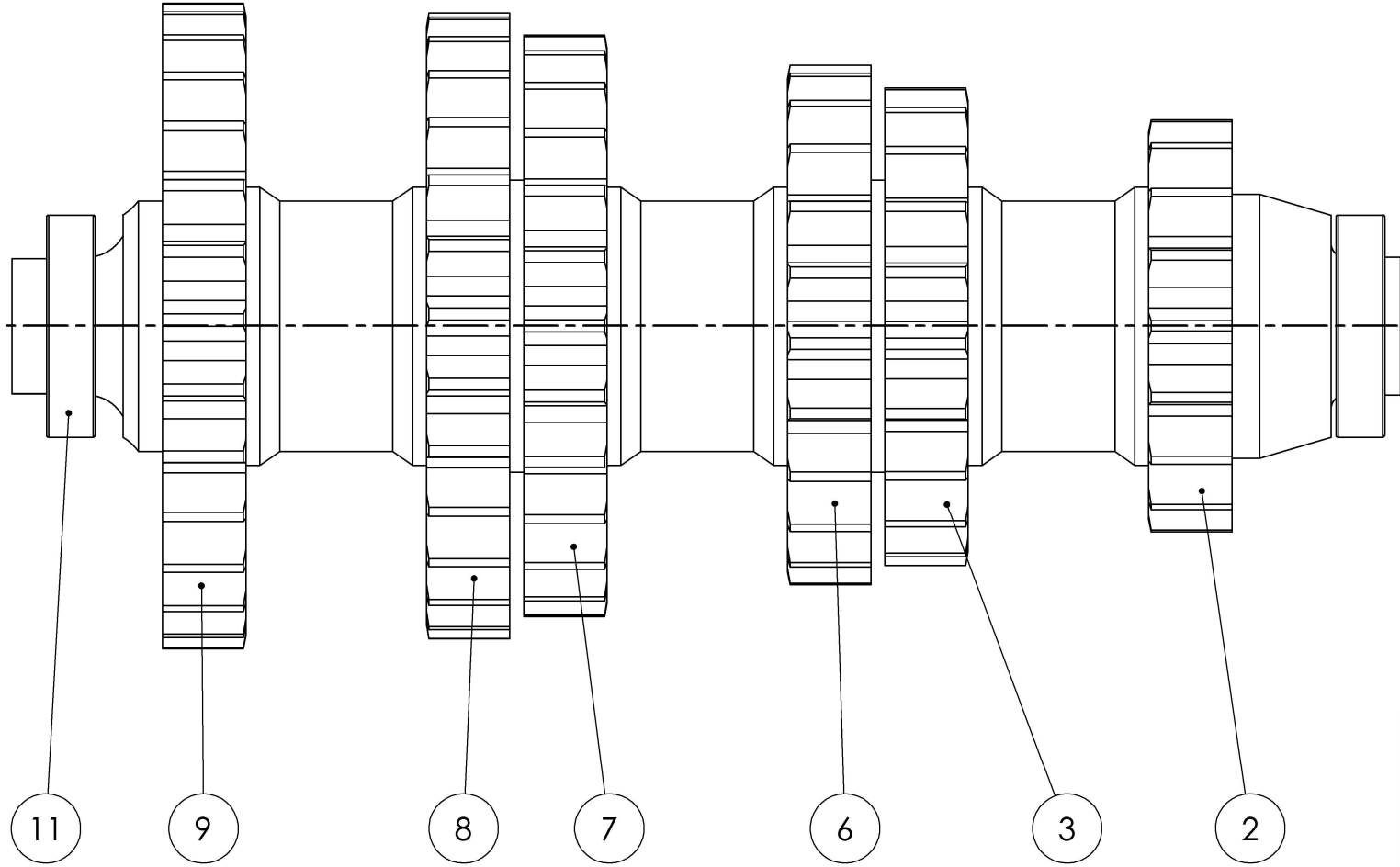
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	IBT-01-01-01	Eje primario	1
2	IBT-01-01-02	Engranaje recto M3 18T W12	1
3	IBT-01-01-03	Engranaje recto M3 21T W12	1
4	IBT-01-01-04	Separador	3
5	IBT-01-01-05	Arandela Dint=32 , e=2	2
6	IBT-01-01-06	Engranaje recto M3 23T W12	1
7	IBT-01-01-07	Engranaje recto M3 26T W12	1
8	IBT-01-01-08	Engranaje recto M3 28T W12	1
9	IBT-01-01-09	Engranaje recto M3 29T W12	1
10	IBT-01-01-10	Anillo de retención primario	1
11	SKF - 61804 - 18,SI,NC,18_68	Rodamiento de bolas d=20, D=32, e=7	2

FECHA DATE		PROYECTO Diseño y prototipado de una caja de cambios	ESPECIFICACIONES GENERALES	
DIBUJADO	20/10/2020		MATAR ARISTAS	0.5X45°
APROBADO		DENOMINACIÓN	Explosión eje primario	
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL	PLA	
E.T.S.I.I.T		PESO (g)	320	
upna		PLANO N°	IBT-01-01-00	
				ESCALA A3 1:2



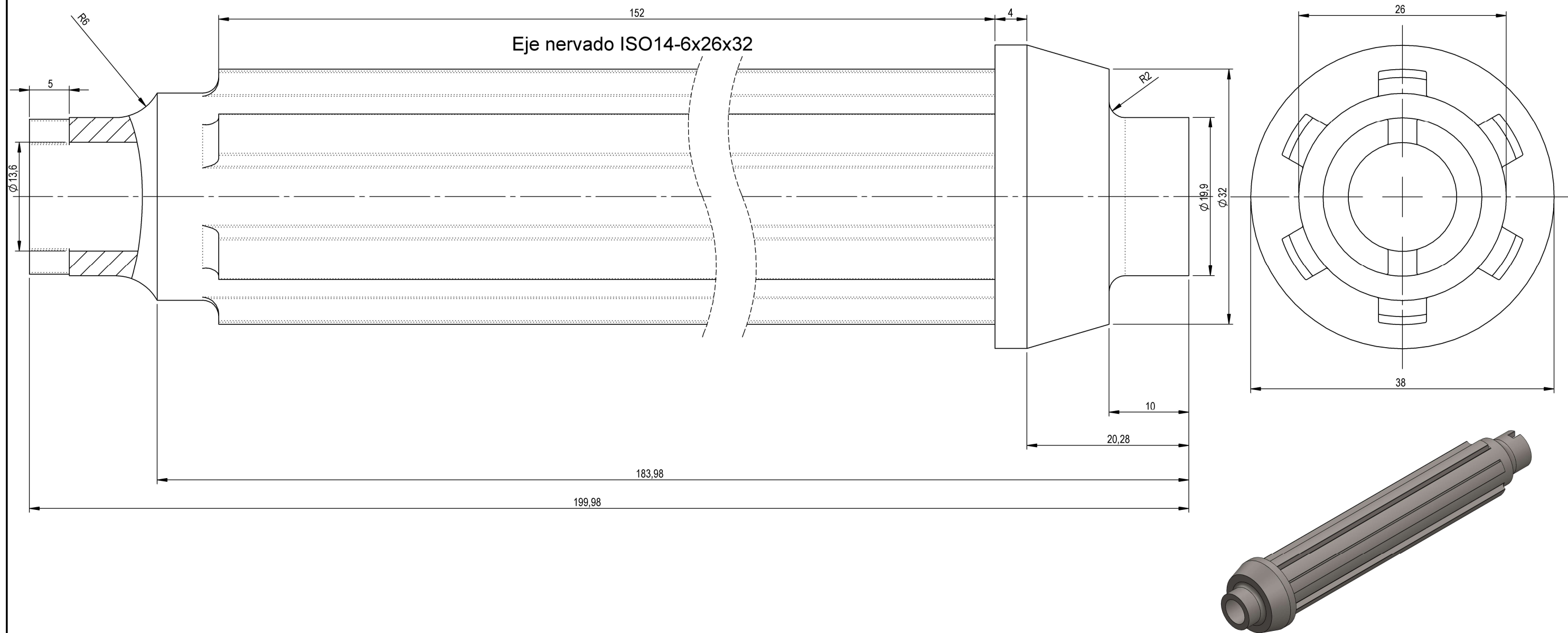
A-A



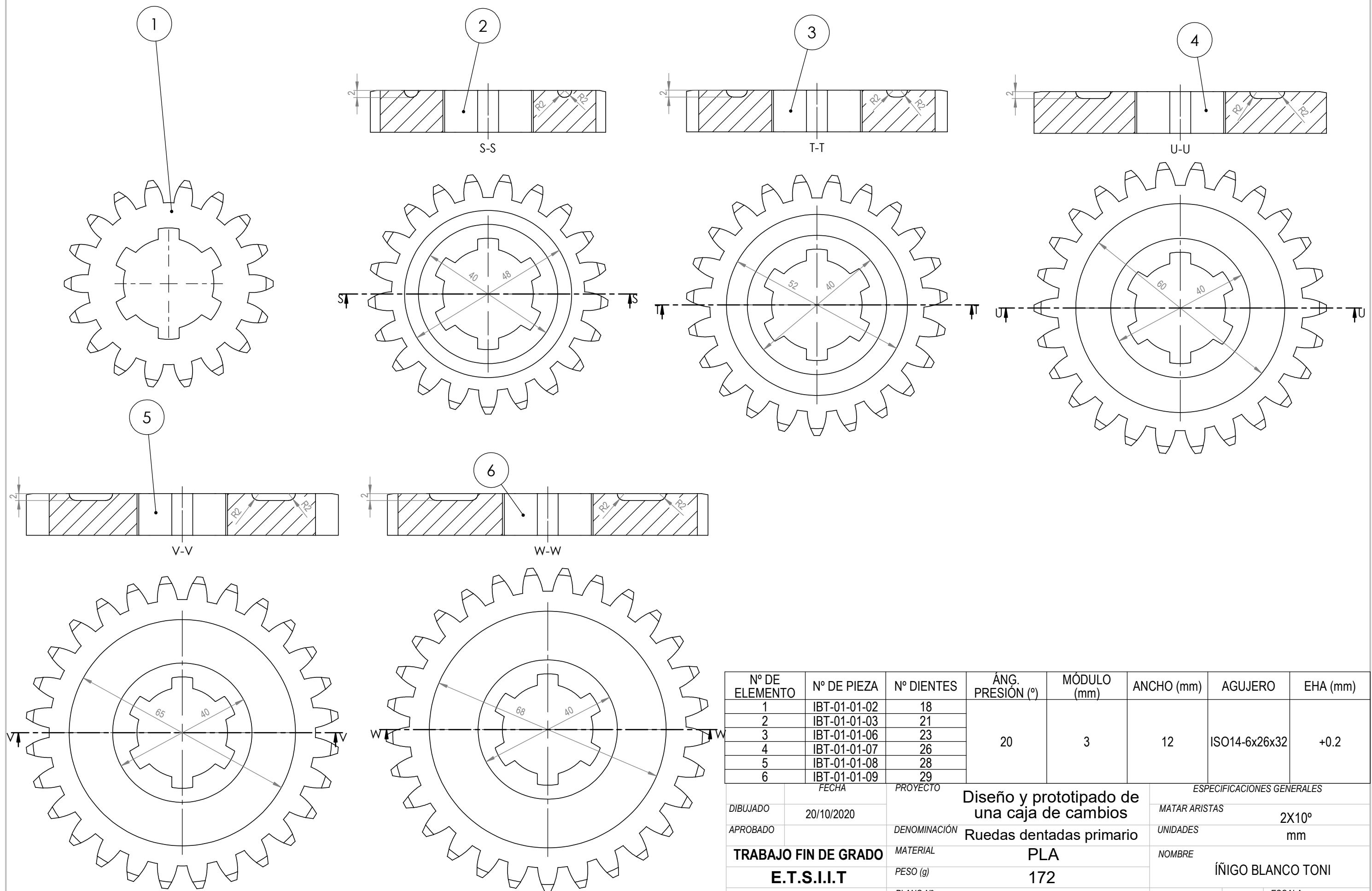



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	IBT-01-01-01	Eje primario	1
2	IBT-01-01-02	Engranaje recto M3 18T W12	1
3	IBT-01-01-03	Engranaje recto M3 21T W12	1
4	IBT-01-01-04	Separador	3
5	IBT-01-01-05	Arandela d=32, D=42, e=2	2
6	IBT-01-01-06	Engranaje recto M3 23T W12	1
7	IBT-01-01-07	Engranaje recto M3 26T W12	1
8	IBT-01-01-08	Engranaje recto M3 28T W12	1
9	IBT-01-01-09	Engranaje recto M3 29T W12	1
10	IBT-01-01-10	Anillo retención primario	1
11	SKF - 61804 - 18,SI,NC,18_68	Rodamiento de bolas d=20, D=32, e=7	2

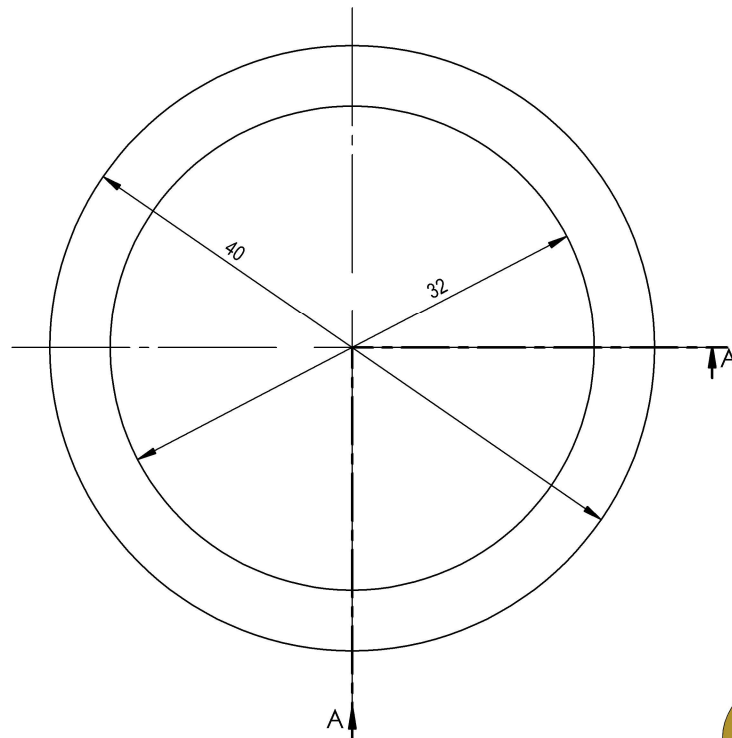
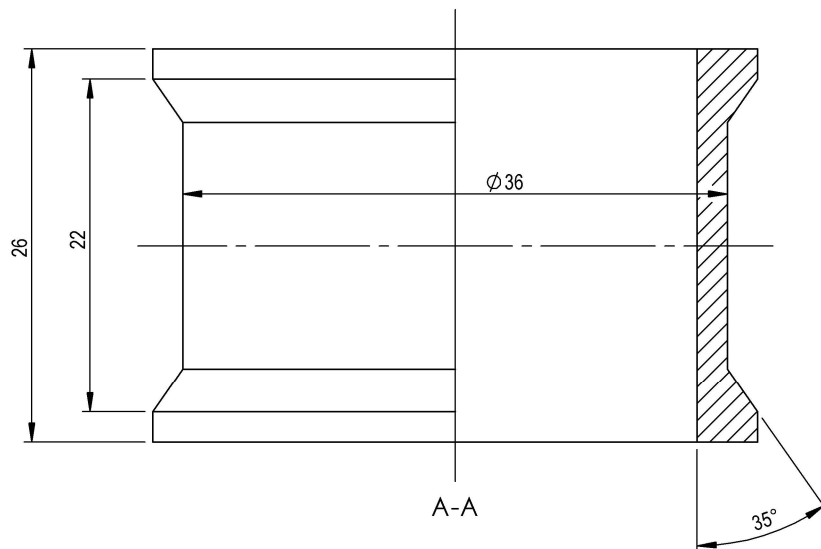
FECHA		PROYECTO	ESPECIFICACIONES GENERALES	
DIBUJADO	20/10/2020	Diseño y prototipado de una caja de cambios		MATAR ARISTAS
APROBADO		DENOMINACIÓN	Sección ensamblaje primario	UNIDADES
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL	PLA	NOMBRE
E.T.S.I.I.T		PESO (g)	320	ÍÑIGO BLANCO TONI
upna		PLANO Nº	TFG-01-01-00	ESCALA
				1:1



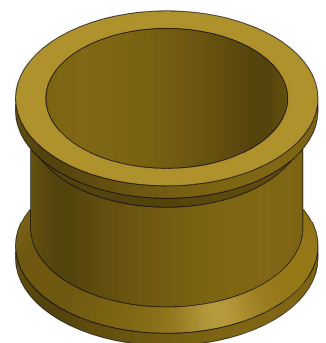
	FECHA	PROYECTO Diseño y prototipado de una caja de cambios	ESPECIFICACIONES GENERALES	
DIBUJADO	20/10/2020		MATAR ARISTAS	0.5X45°
APROBADO		DENOMINACIÓN	Eje primario	
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL	PLA	
E.T.S.I.I.T		PESO (g)	85	
up ^{na}		PLANO N°	IBT-01-01-01	
				ESCALA A3 2:1




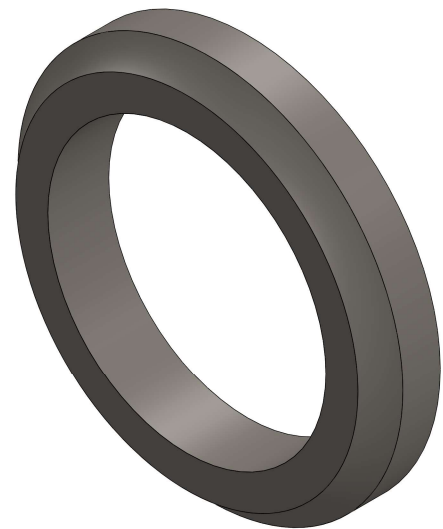
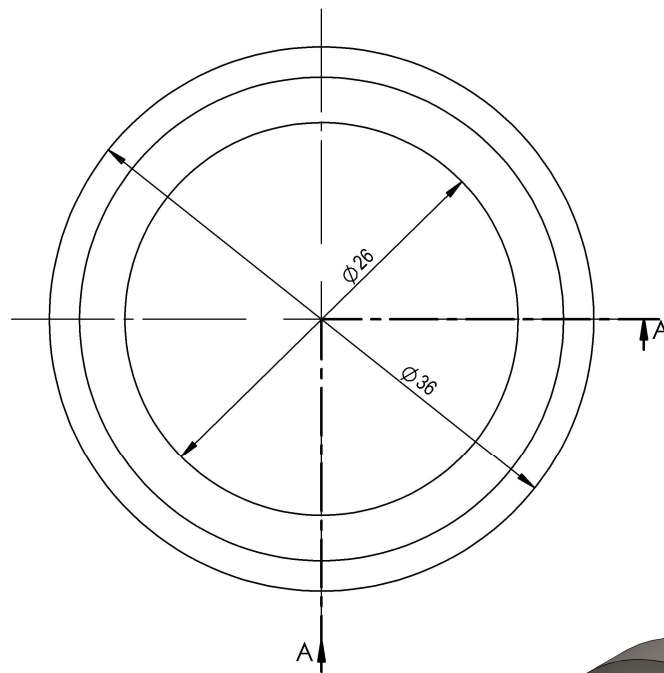
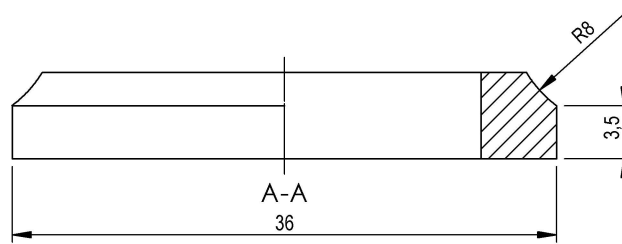
Nº DE ELEMENTO	Nº DE PIEZA	Nº DIENTES	ÁNG. PRESIÓN (º)	MÓDULO (mm)	ANCHO (mm)	AGUJERO	EHA (mm)
1	IBT-01-01-02	18	20	3	12	ISO14-6x26x32	+0.2
2	IBT-01-01-03	21					
3	IBT-01-01-06	23					
4	IBT-01-01-07	26					
5	IBT-01-01-08	28					
6	IBT-01-01-09	29					
FECHA		PROYECTO			ESPECIFICACIONES GENERALES		
DIBUJADO	20/10/2020	Diseño y prototipado de una caja de cambios			MATAR ARISTAS		
APROBADO					2X10º		
		DENOMINACIÓN	Ruedas dentadas primario			UNIDADES	
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL	PLA			NOMBRE	
E.T.S.I.I.T		PESO (g)	172			ÍÑIGO BLANCO TONI	
up ^{na}		PLANO Nº	IBT-01-01-00				ESCALA
						A3	1:1




Fabricación:
EHA = +0.3 mm

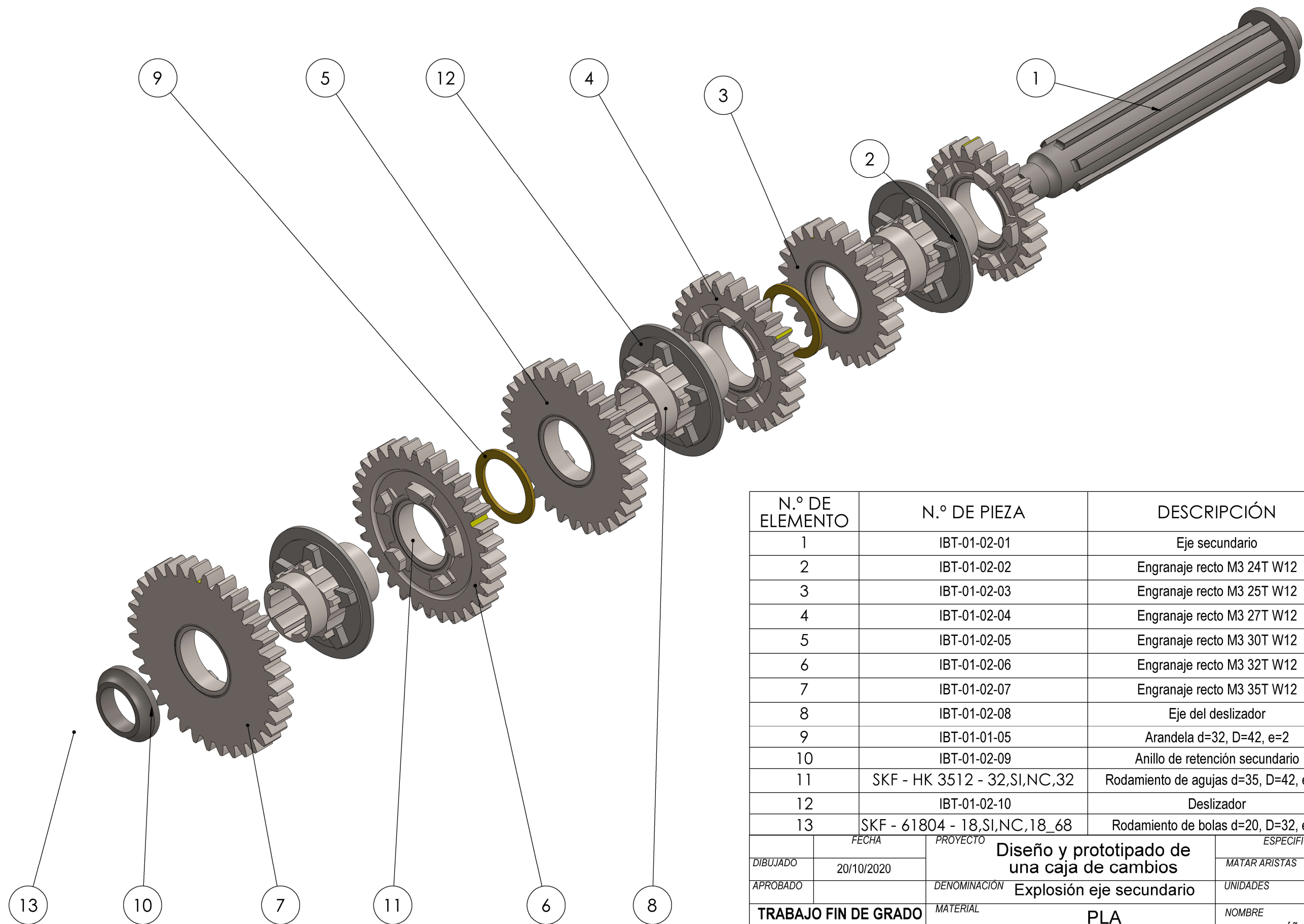


	FECHA	PROYECTO Diseño y prototipado de una caja de cambios	ESPECIFICACIONES GENERALES		
DIBUJADO	20/10/2020		MATAR ARISTAS	0.5X45°	
APROBADO		DENOMINACIÓN Separador eje primario	UNIDADES	mm	
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL PLA	NOMBRE ÍÑIGO BLANCO TONI		
E.T.S.I.I.T		PESO (g) 7			
up ^{na}		PLANO N° IBT-01-01-04		A4	ESCALA SCALE 2:1



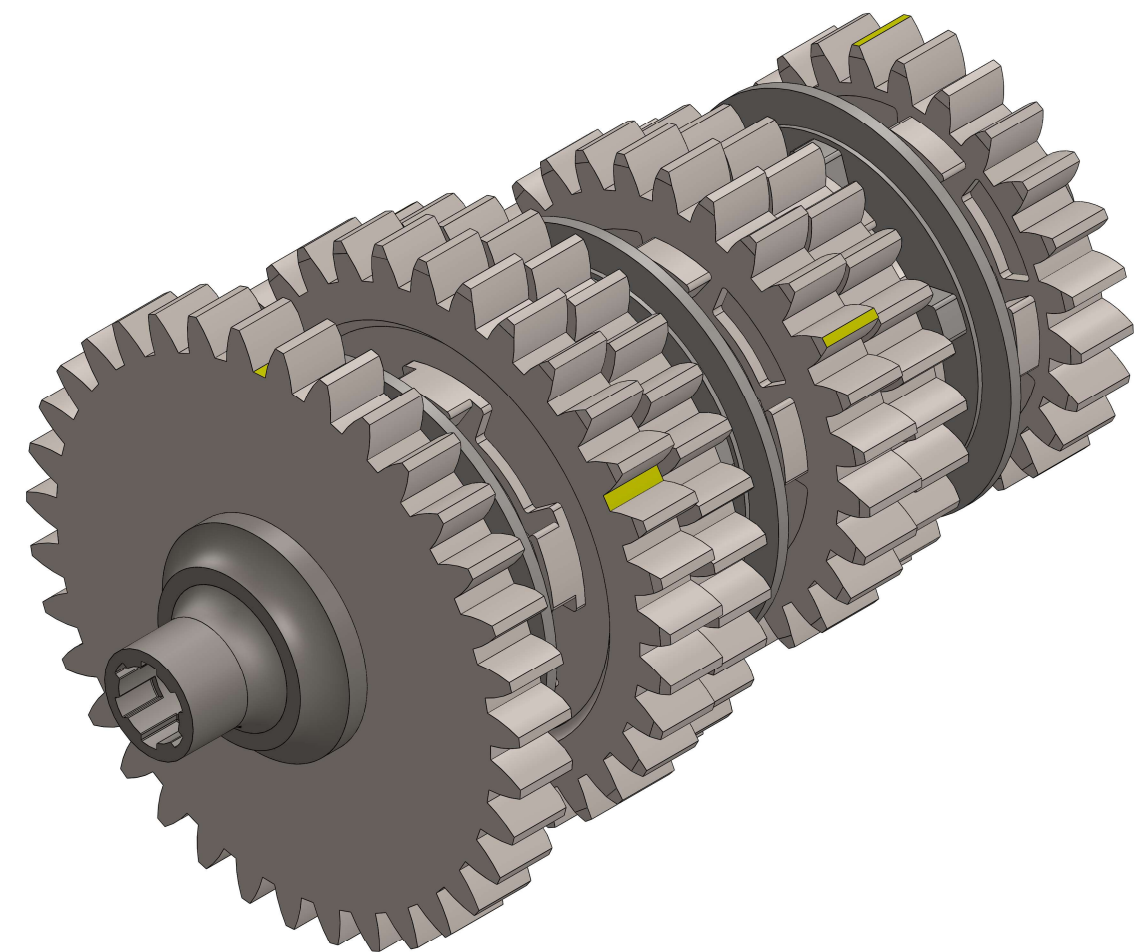
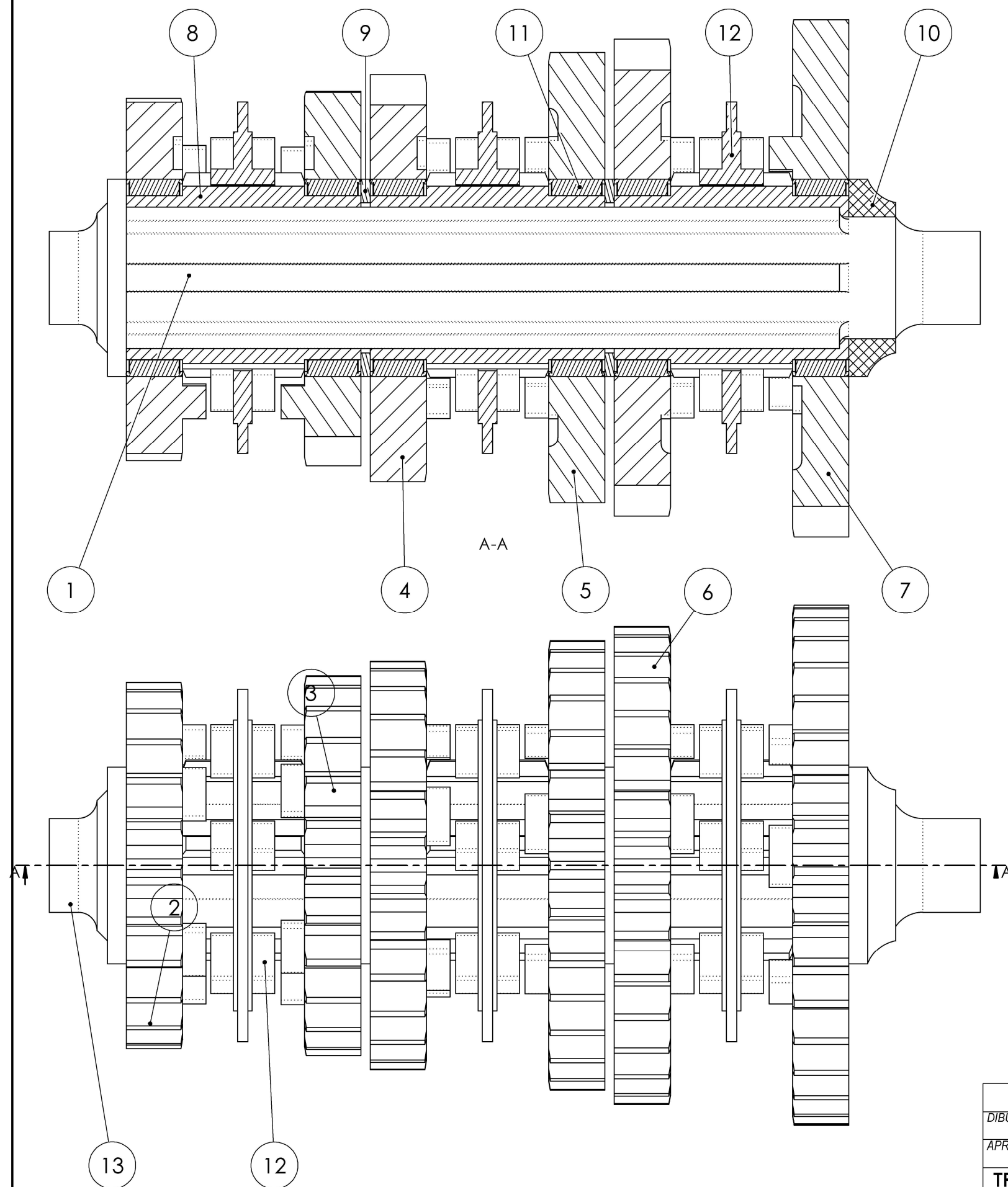
Fabricación:
EHA= +0.2 mm

	FECHA	PROYECTO	ESPECIFICACIONES GENERALES		
DIBUJADO	20/10/2020	Diseño y prototipado de una caja de cambios	MATAR ARISTAS	0.5X45°	
APROBADO			DENOMINACIÓN	Anillo retención primario	UNIDADES
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL	PLA	NOMBRE	
E.T.S.I.I.T		PESO (g)	2	ÍÑIGO BLANCO TONI	
up ^{na}		PLANO Nº	TFG-01-01-10		A4
				ESCALA	2:1



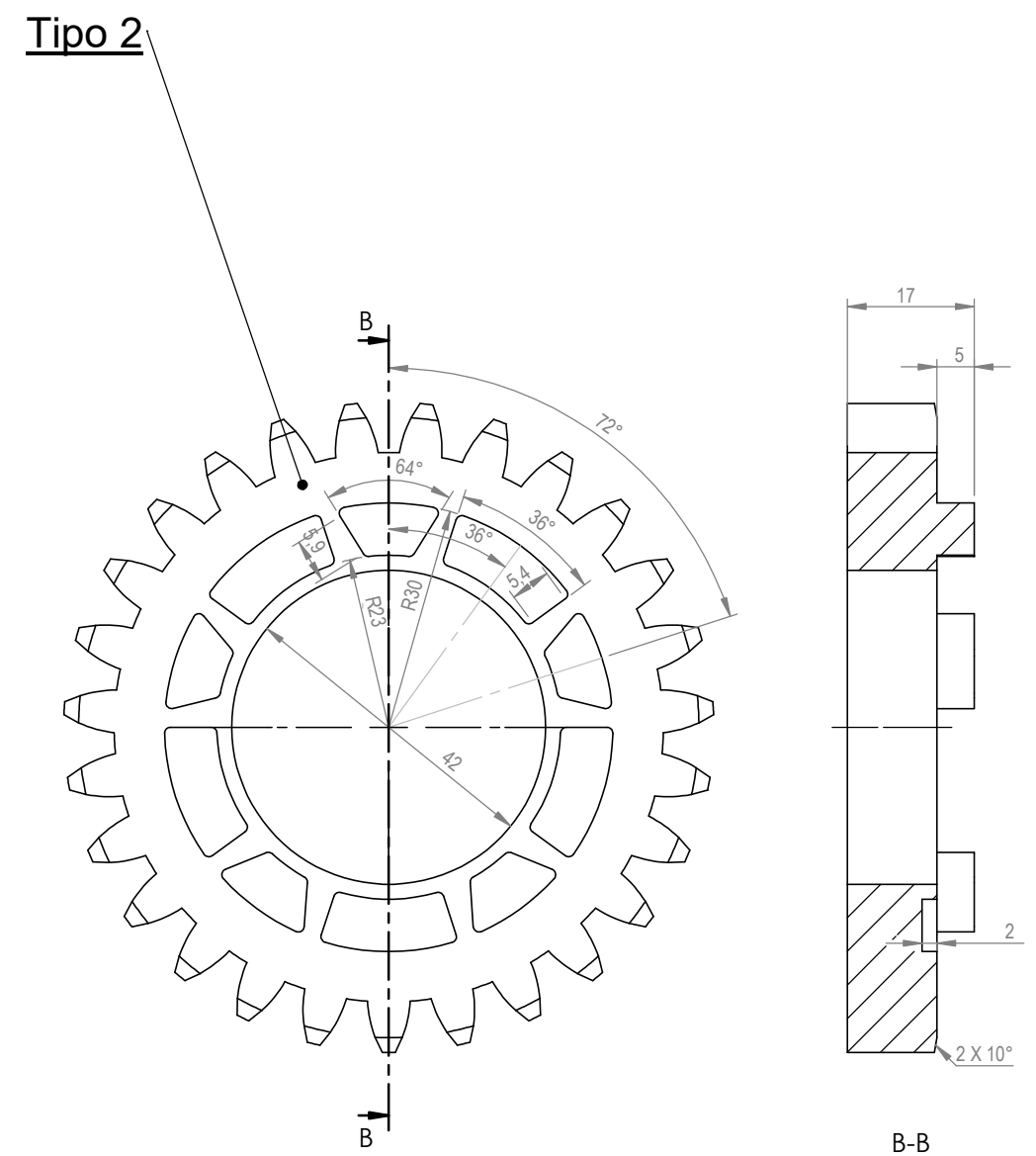
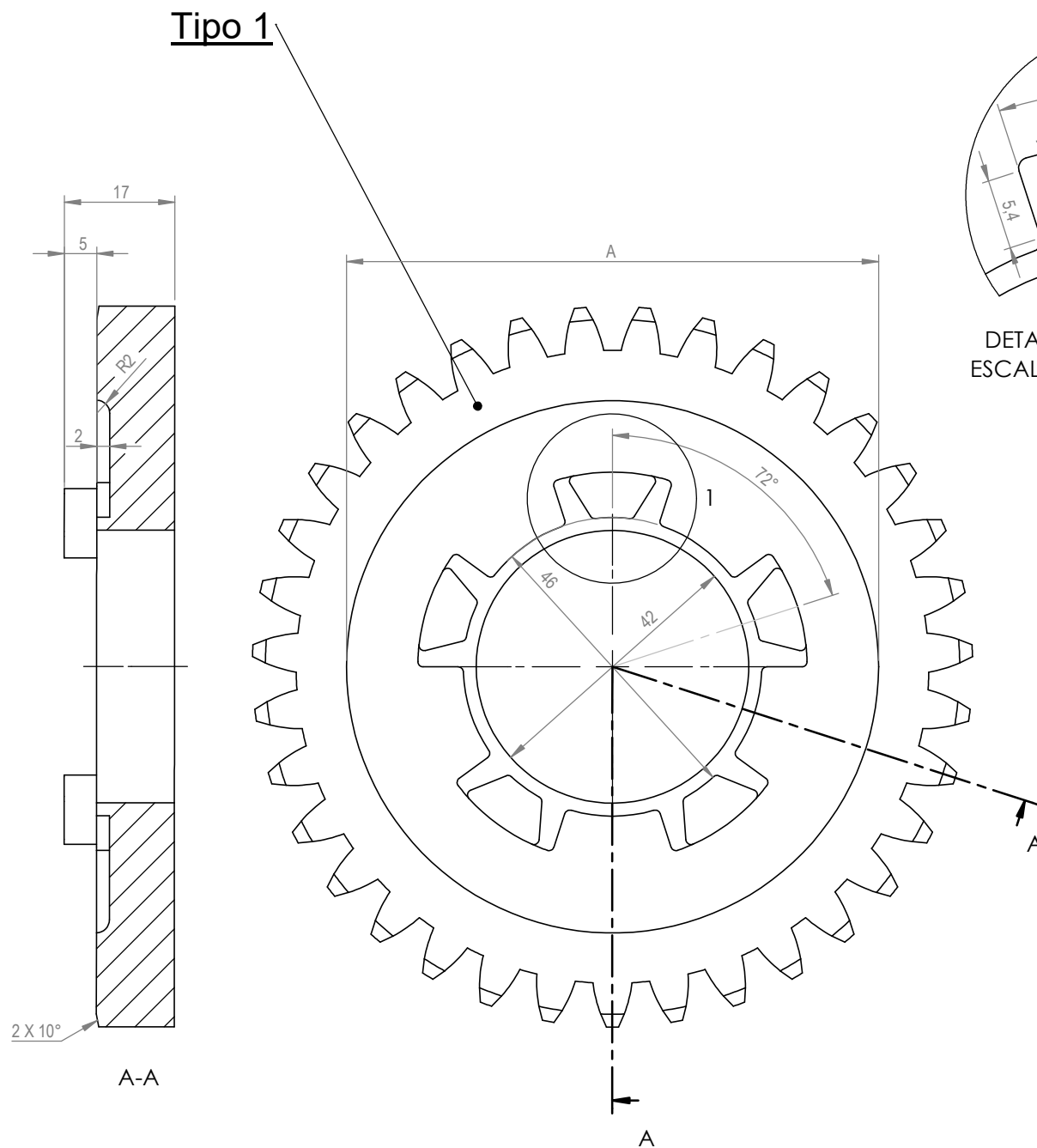
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	IBT-01-02-01	Eje secundario	1
2	IBT-01-02-02	Engranaje recto M3 24T W12	1
3	IBT-01-02-03	Engranaje recto M3 25T W12	1
4	IBT-01-02-04	Engranaje recto M3 27T W12	1
5	IBT-01-02-05	Engranaje recto M3 30T W12	1
6	IBT-01-02-06	Engranaje recto M3 32T W12	1
7	IBT-01-02-07	Engranaje recto M3 35T W12	1
8	IBT-01-02-08	Eje del deslizador	3
9	IBT-01-01-05	Arandela d=32, D=42, e=2	2
10	IBT-01-02-09	Anillo de retención secundario	1
11	SKF - HK 3512 - 32,SI,NC,32	Rodamiento de agujas d=35, D=42, e=12	6
12	IBT-01-02-10	Deslizador	3
13	SKF - 61804 - 18,SI,NC,18_68	Rodamiento de bolas d=20, D=32, e=7	2

FECHA		PROYECTO	ESPECIFICACIONES GENERALES	
DIBUJADO	20/10/2020		MATAR ARISTAS	0.5X45°
APROBADO		DENOMINACIÓN	UNIDADES	mm
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL	NOMBRE	
E.T.S.I.I.T		PESO (Kg)	ÍÑIGO BLANCO TONI	
upna		PLANO Nº	ESCALA	
		IBT-01-02-00	A3	1:2

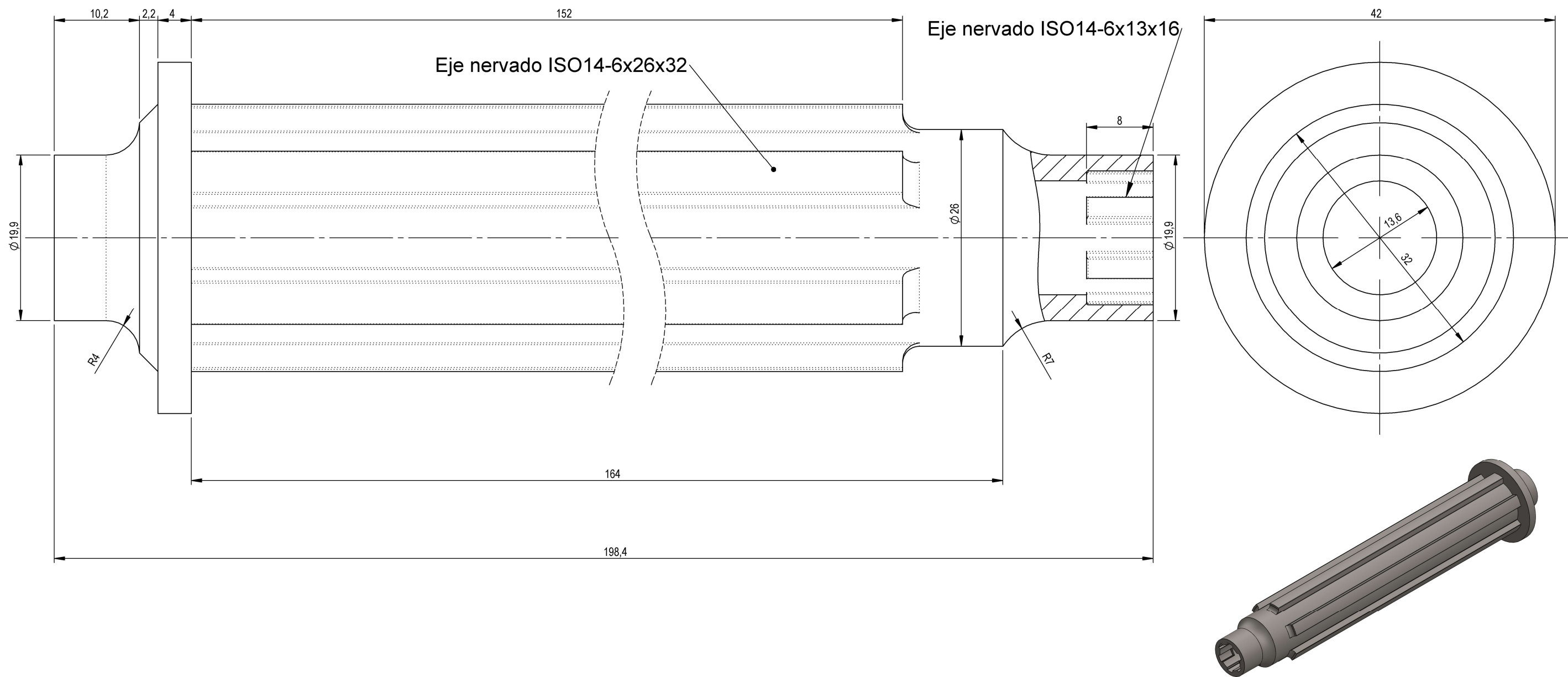


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	IBT-01-02-01	Eje secundario	1
2	IBT-01-02-02	Engranaje recto M3 24T W12	1
3	ITB-01-02-03	Engranaje recto M3 25T W12	1
4	IBT-01-02-04	Engranaje recto M3 27T W12	1
5	IBT-01-02-05	Engranaje recto M3 30T W12	1
6	IBT-01-02-06	Engranaje recto M3 32T W12	1
7	IBT-01-02-07	Engranaje recto M3 35T W12	1
8	IBT-01-02-08	Eje del deslizador	3
9	IBT-01-01-05	Arandela d=32, D=42, e=2	2
10	IBT-01-02-09	Anillo de retención secundario	1
11	SKF - HK 3512 - 32,SI,NC,32	Rodamiento de agujas d=32, D=42, e=12	6
12	IBT-01-02-10	Deslizador	3
13	SKF - 61804 - 18,SI,NC,18_68	Rodamiento de bolas d=20, D=32, e=7	2

FECHA		PROYECTO	ESPECIFICACIONES GENERALES	
DIBUJADO	20/10/2020		MATAR ARISTAS	0.5X45°
APROBADO		DENOMINACIÓN	UNIDADES	mm
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL	NOMBRE	
E.T.S.I.I.T		PESO (Kg)	ÍÑIGO BLANCO TONI	
upna		PLANO Nº	ESCALA	1:1




Nº PIEZA		TIPO 1	TIPO 2	A (mm)	EHA (mm)	Peso (g)
IBT-01-02-02		-	X	-	+0.26	27
IBT-01-02-03		-	X	-		30
IBT-01-02-04		-	X	-		36
IBT-01-02-05		X	-	72		44
IBT-01-02-06		X	-	75		51
IBT-01-02-07		X	-	82		61
FECHA		PROYECTO			ESPECIFICACIONES GENERALES	
DIBUJADO	20/10/2020	Diseño y prototipado de una caja de cambios Ruedas dentadas secundario			MATAR ARISTAS	R0.8
APROBADO					DENOMINACIÓN	UNIDADES
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL			NOMBRE	
E.T.S.I.I.T		PESO (g)			ÍÑIGO BLANCO TONI	
up ^{na}		PLANO Nº				ESCALA
		IBT-01-02-00			A3	1:1

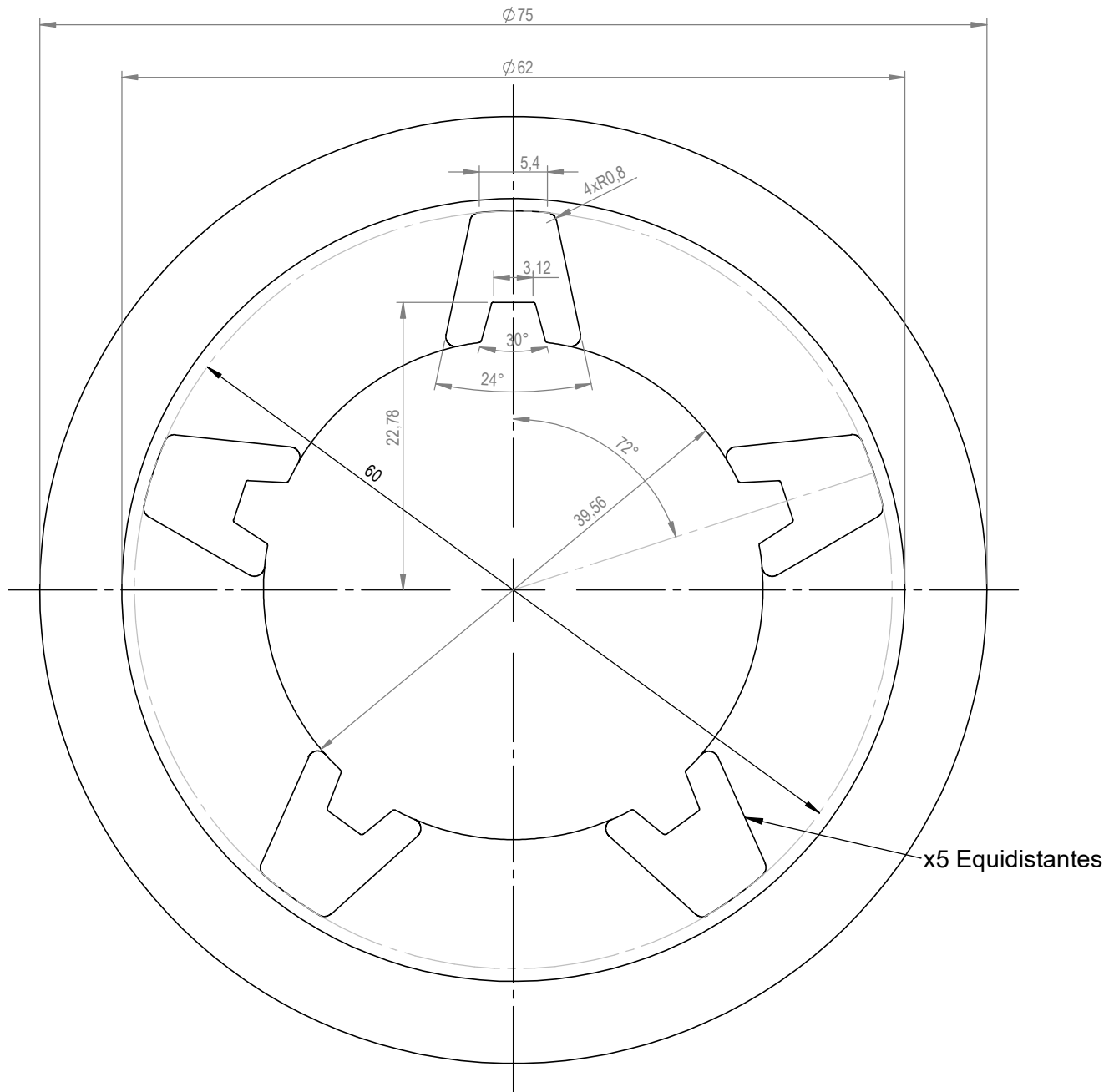
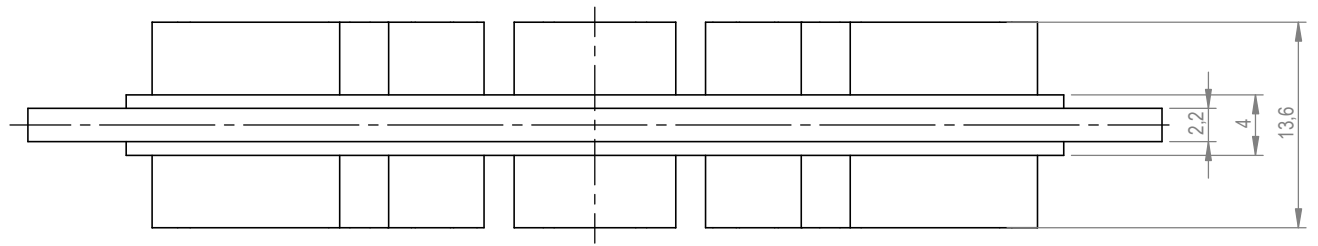




	FECHA	PROYECTO Diseño y prototipado de una caja de cambios	ESPECIFICACIONES GENERALES	
DIBUJADO	20/10/2020		MATAR ARISTAS	0.5X45°
APROBADO		DENOMINACIÓN	Eje secundario	
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL	PLA	
E.T.S.I.I.T		PESO (g)	86	
up ^{na}		PLANO N°	IBT-01-02-01	
				A3
			ESCALA	2:1



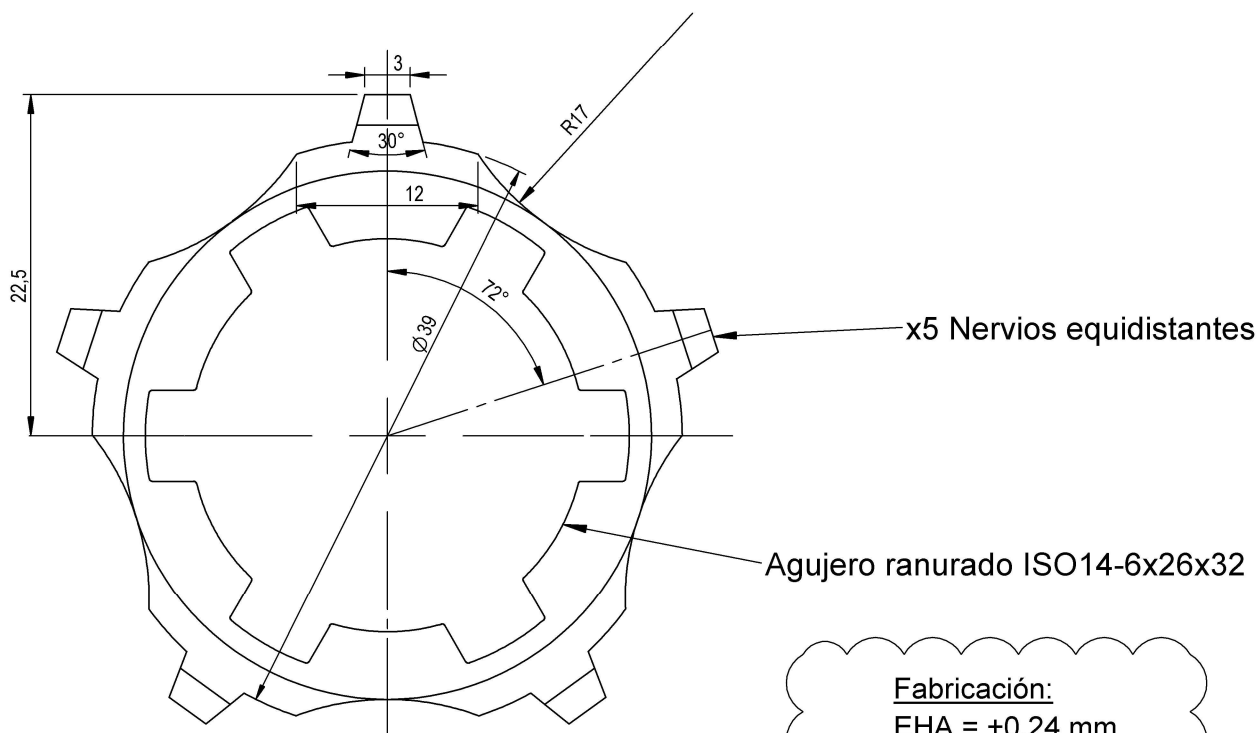
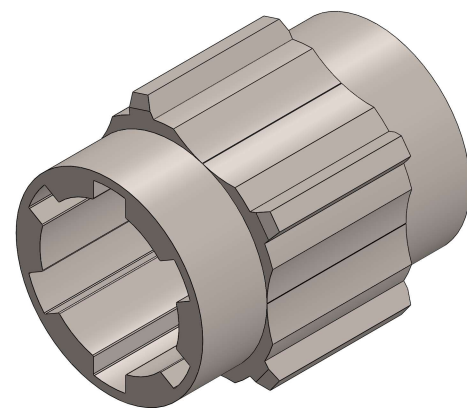
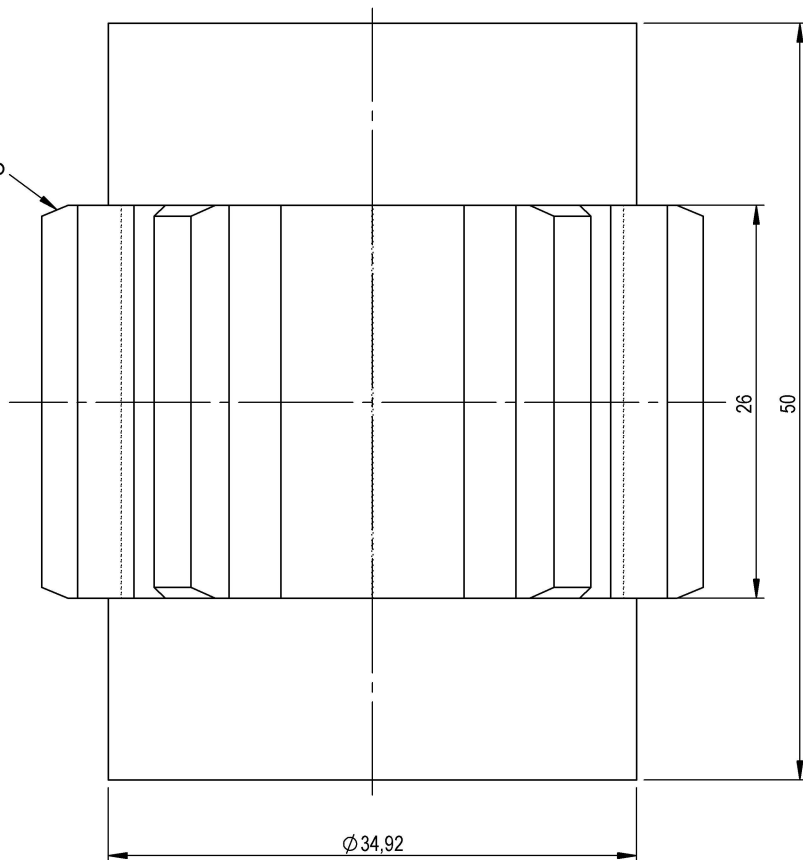
Fabricación:
EHA = +0.2 mm

	FECHA	PROYECTO	ESPECIFICACIONES GENERALES		
DIBUJADO	20/10/2020	Diseño y prototipado de una caja de cambios	MATAR ARISTAS 0.5X45°		
APROBADO			UNIDADES mm		
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL	NOMBRE		
E.T.S.I.I.T		PLA	ÍÑIGO BLANCO TONI		
		PESO (g)			
up ^{na}		PLANO N°			
		TFG-01-02-09		A4	ESCALA 2:1



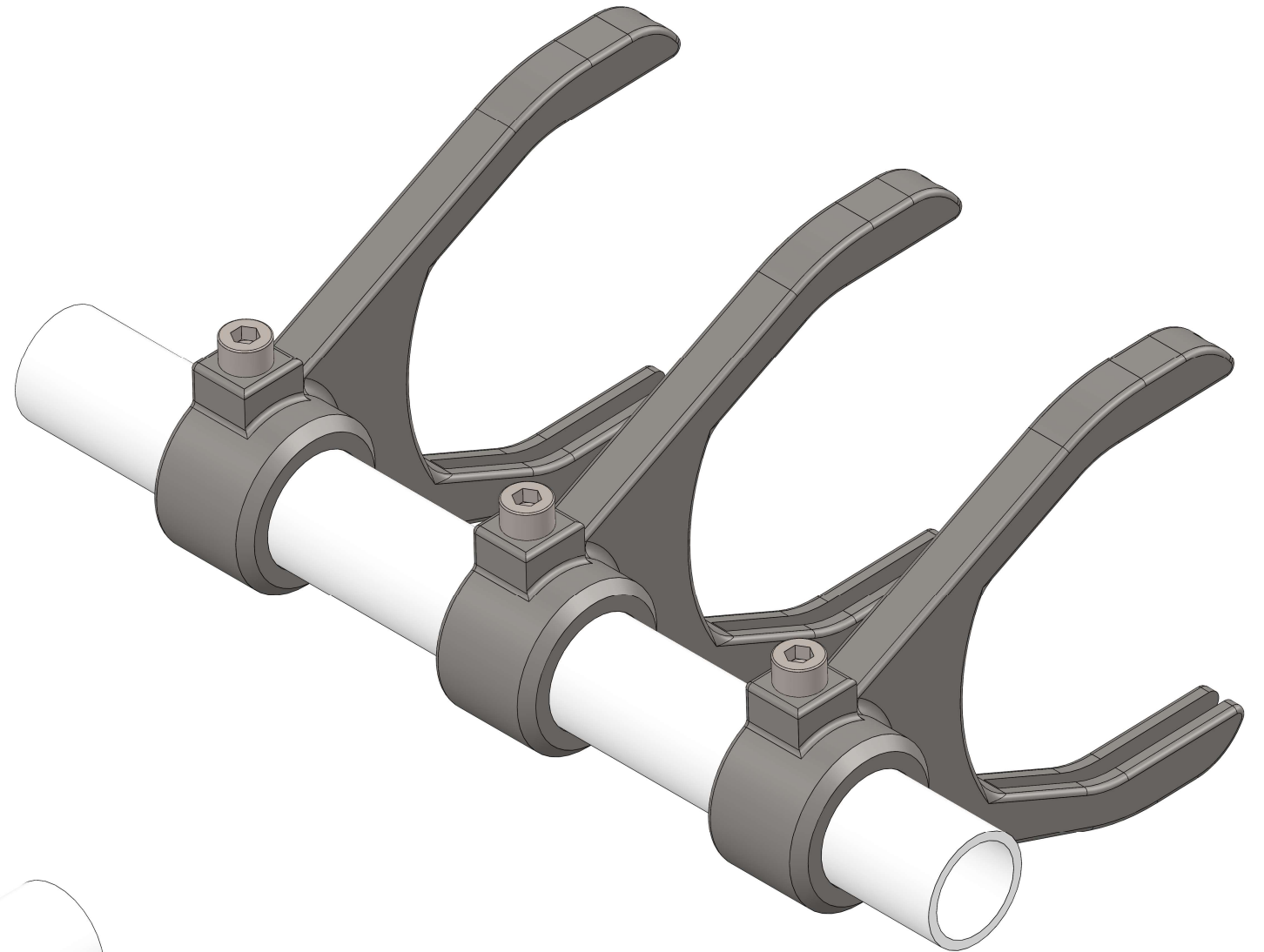
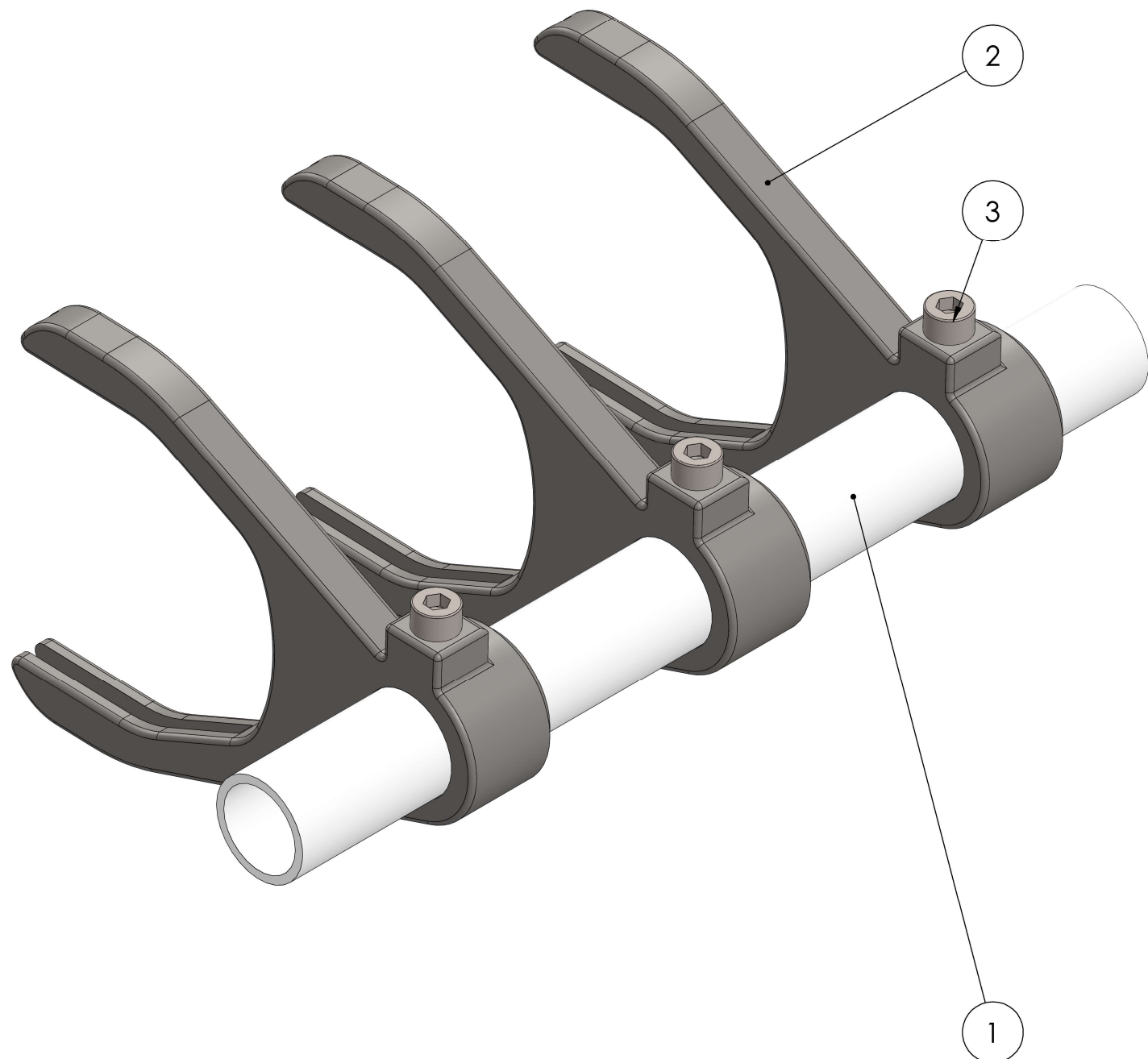
DIBUJADO	FECHA	PROYECTO	Diseño y prototipado de una caja de cambios	ESPECIFICACIONES GENERALES	
	20/10/2020			MATAR ARISTAS	0.5X45°
APROBADO		DENOMINACIÓN	Deslizador	UNIDADES	mm
TRABAJO FIN DE GRADO E.T.S.I.I.T		MATERIAL	PLA	NOMBRE	ÍÑIGO BLANCO TONI
		PESO (g)	19		
up ^{na}		PLANO Nº	IBT-01-02-10	 	ESCALA

2x20°




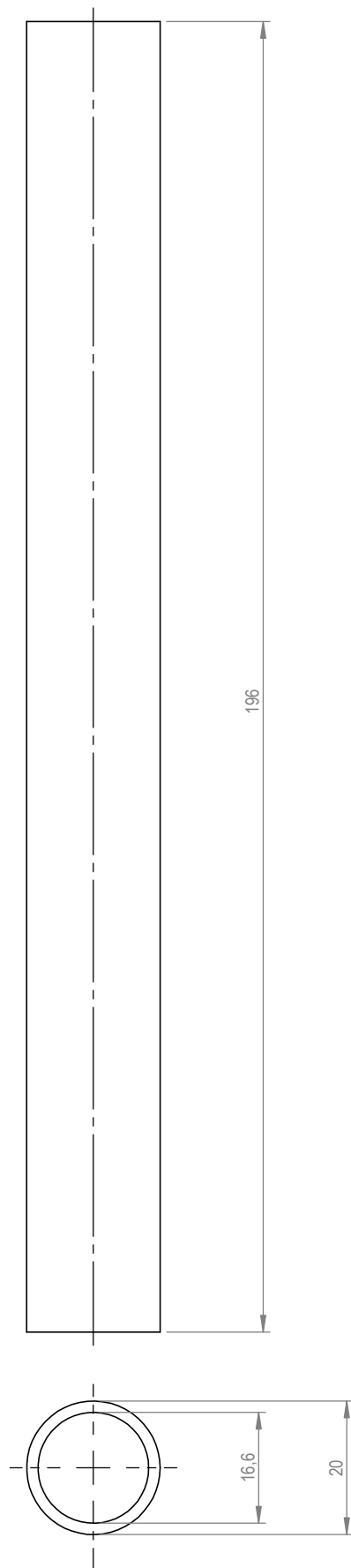
Fabricación:
EHA = +0.24 mm


FECHA		PROYECTO	ESPECIFICACIONES GENERALES	
DIBUJADO	20/10/2020		MATAR ARISTAS	R0.2
APROBADO		DENOMINACIÓN	UNIDADES	mm
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL	NOMBRE	
E.T.S.I.I.T		PESO (g)	ÍÑIGO BLANCO TONI	
up ^{na}		PLANO Nº		
		IBT-01-02-08		
			A4	ESCALA 2:1

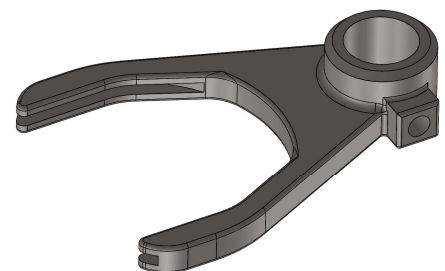



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	IBT-01-03-01	Tubo de PVC	1
2	IBT-01-03-02	Horquilla selectora	3
3	ISO 4762 M5 x 8 - 8N	Tornillo cabeza hueca hexagonal M5x8 mm	3

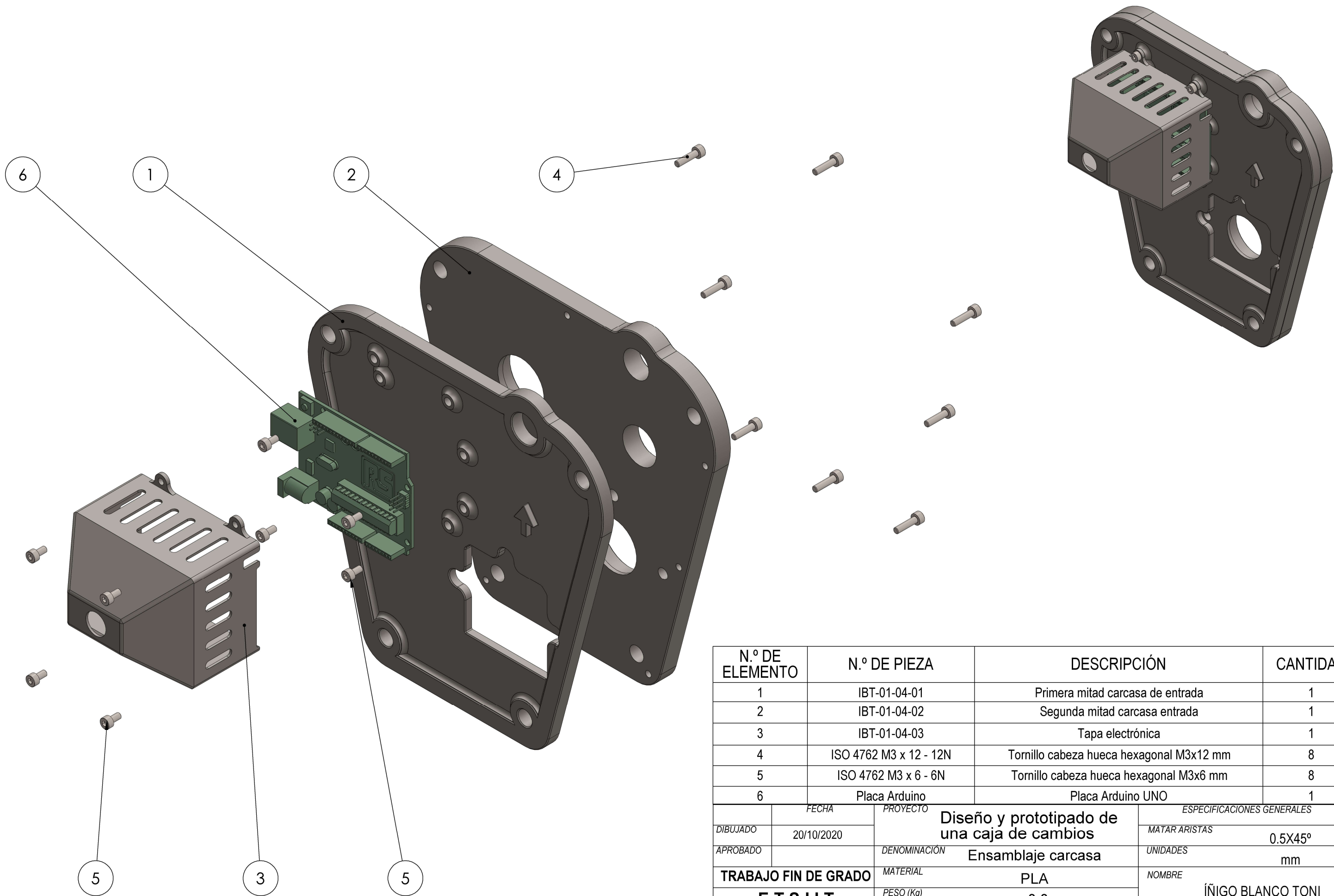
DIBUJADO	FECHA	PROYECTO	ESPECIFICACIONES GENERALES	
	20/10/2020		MATAR ARISTAS	0.5X45º
APROBADO		DENOMINACIÓN	UNIDADES	mm
			NOMBRE	ÍÑIGO BLANCO TONI
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL	PVC, PLA	
E.T.S.I.I.T		PESO (Kg)	0.1	
upna		PLANO Nº	IBT-01-03-00	
				A3 <div> ESCALA 1:1 </div>



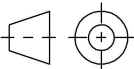
	FECHA	PROYECTO Diseño y prototipado de una caja de cambios	ESPECIFICACIONES GENERALES			
DIBUJADO	20/10/2020		MATAR ARISTAS	0.5X45°		
APROBADO		DENOMINACIÓN Tubo de PVC	UNIDADES	mm		
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL PVC	NOMBRE ÍÑIGO BLANCO TONI			
E.T.S.I.I.T		PESO (g) 25				
up ^{na}		PLANO Nº IBT-01-03-01		A4	ESCALA	1:1

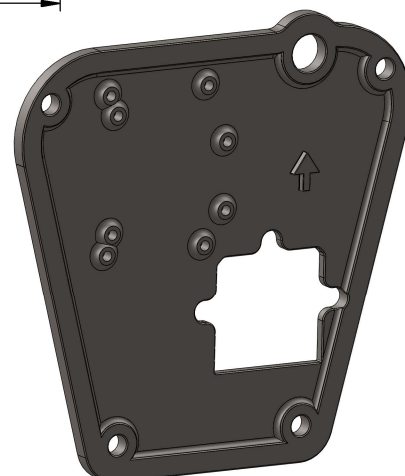
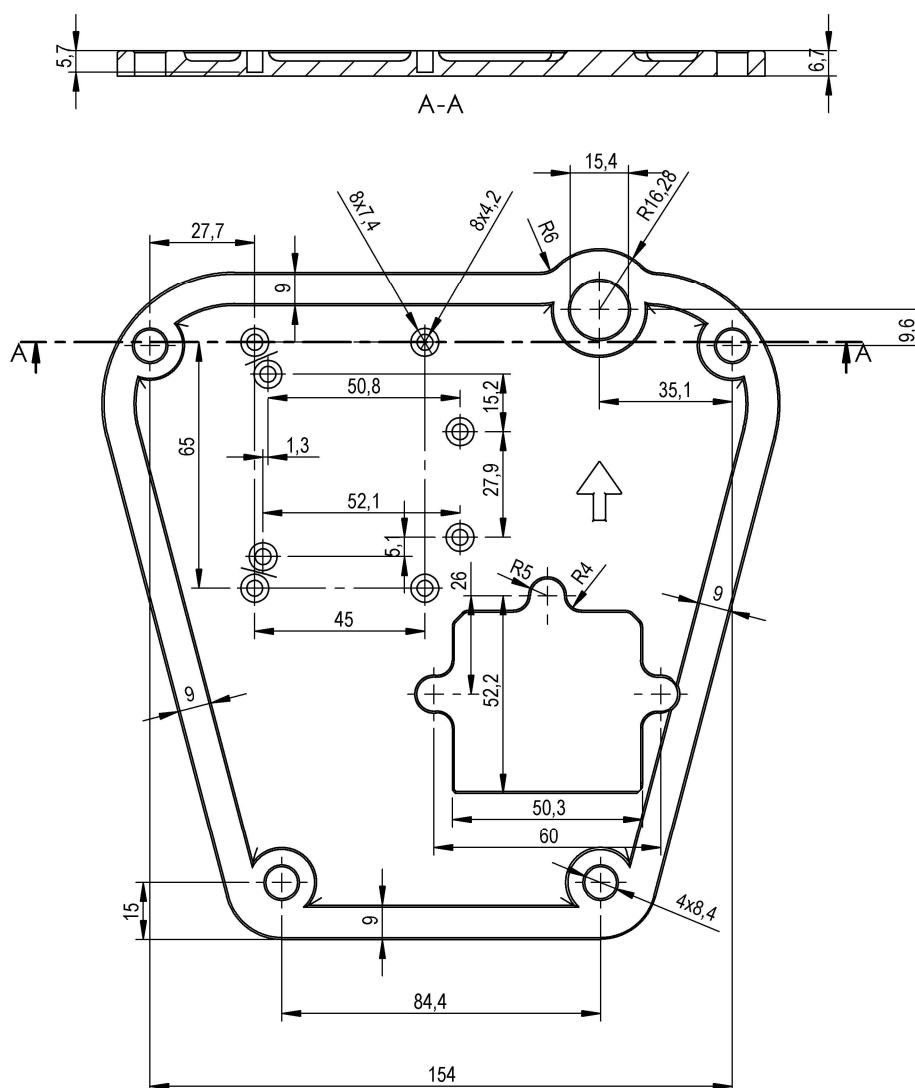


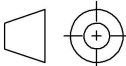
	FECHA	PROYECTO	ESPECIFICACIONES GENERALES		
DIBUJADO	20/10/2020	Diseño y prototipado de una caja de cambios	MATAR ARISTAS R1		
APROBADO			UNIDADES mm		
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL	NOMBRE		
E.T.S.I.I.T		PLA	ÍÑIGO BLANCO TONI		
		PESO (g)			
		23			
up ^{na}		PLANO Nº			
		IBT-01-03-02		A4	ESCALA 1:1

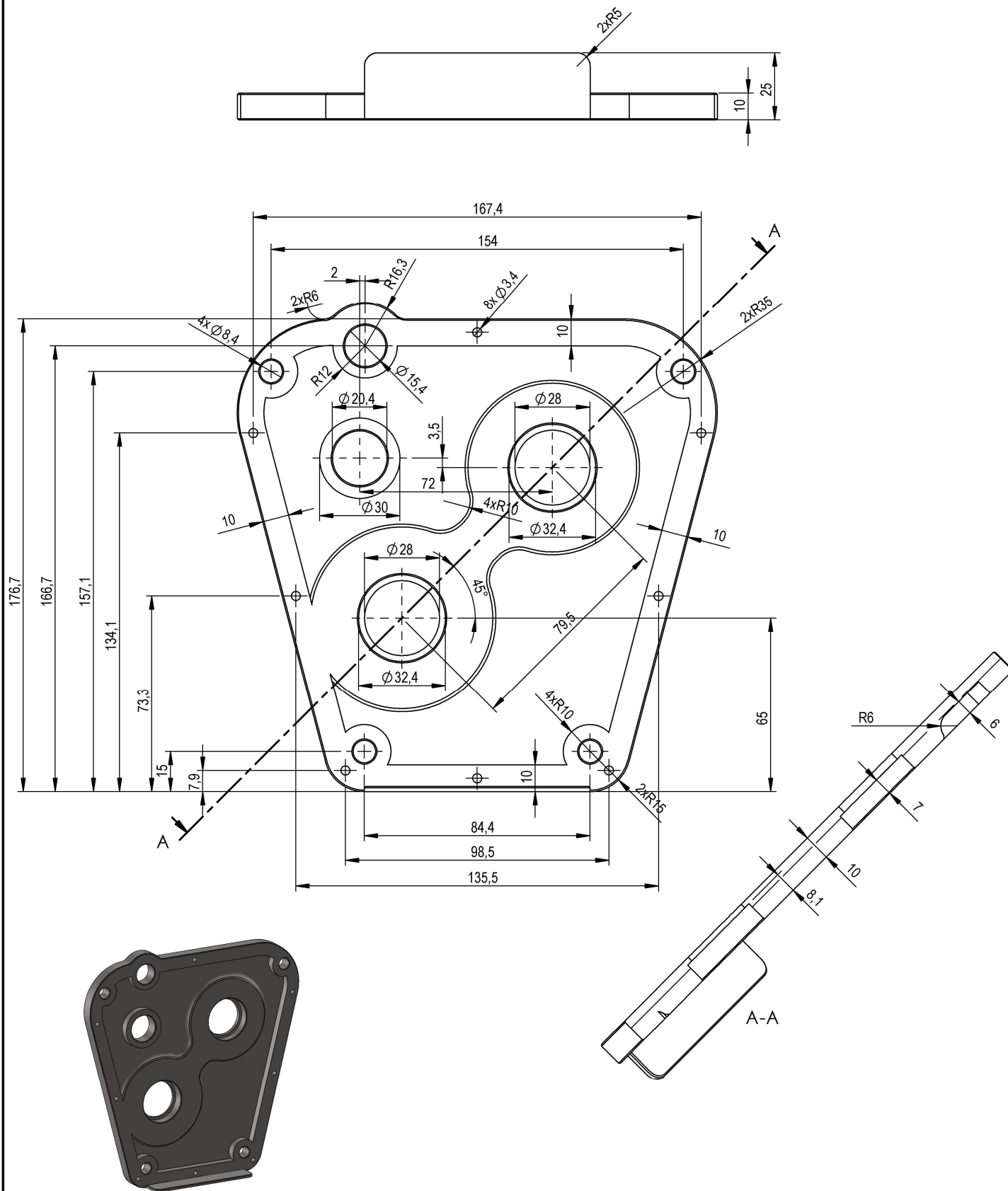



N.º DE ELEMENTO		N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1		IBT-01-04-01	Primera mitad carcasa de entrada	1
2		IBT-01-04-02	Segunda mitad carcasa entrada	1
3		IBT-01-04-03	Tapa electrónica	1
4		ISO 4762 M3 x 12 - 12N	Tornillo cabeza hueca hexagonal M3x12 mm	8
5		ISO 4762 M3 x 6 - 6N	Tornillo cabeza hueca hexagonal M3x6 mm	8
6		Placa Arduino	Placa Arduino UNO	1

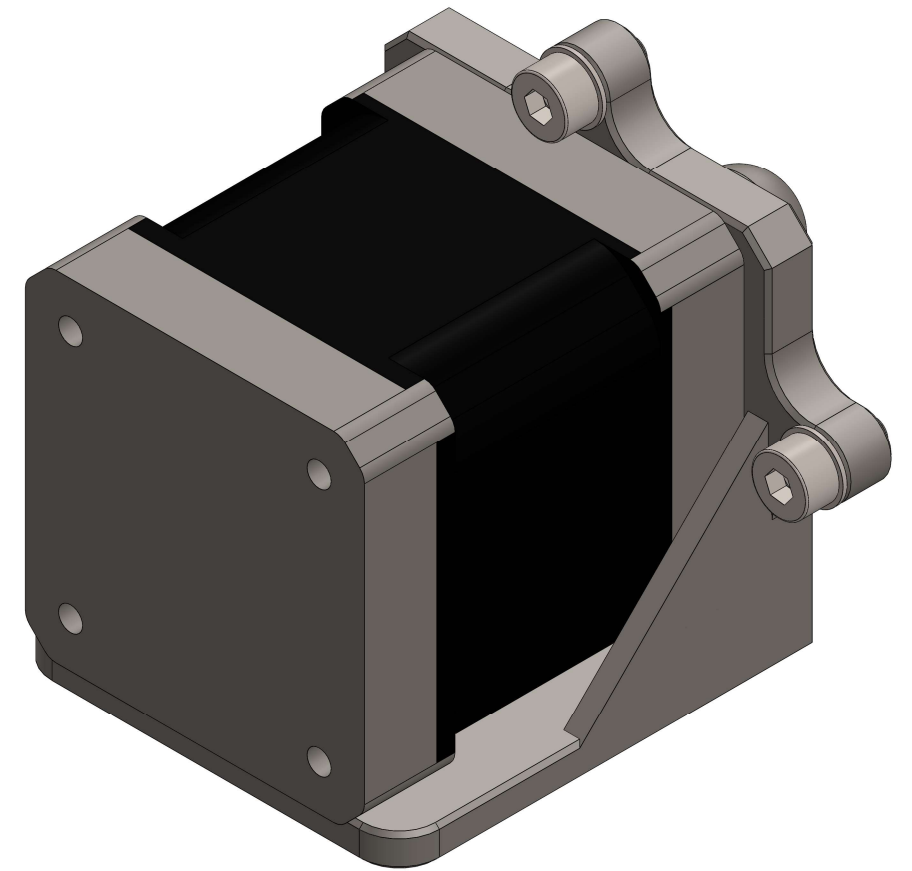
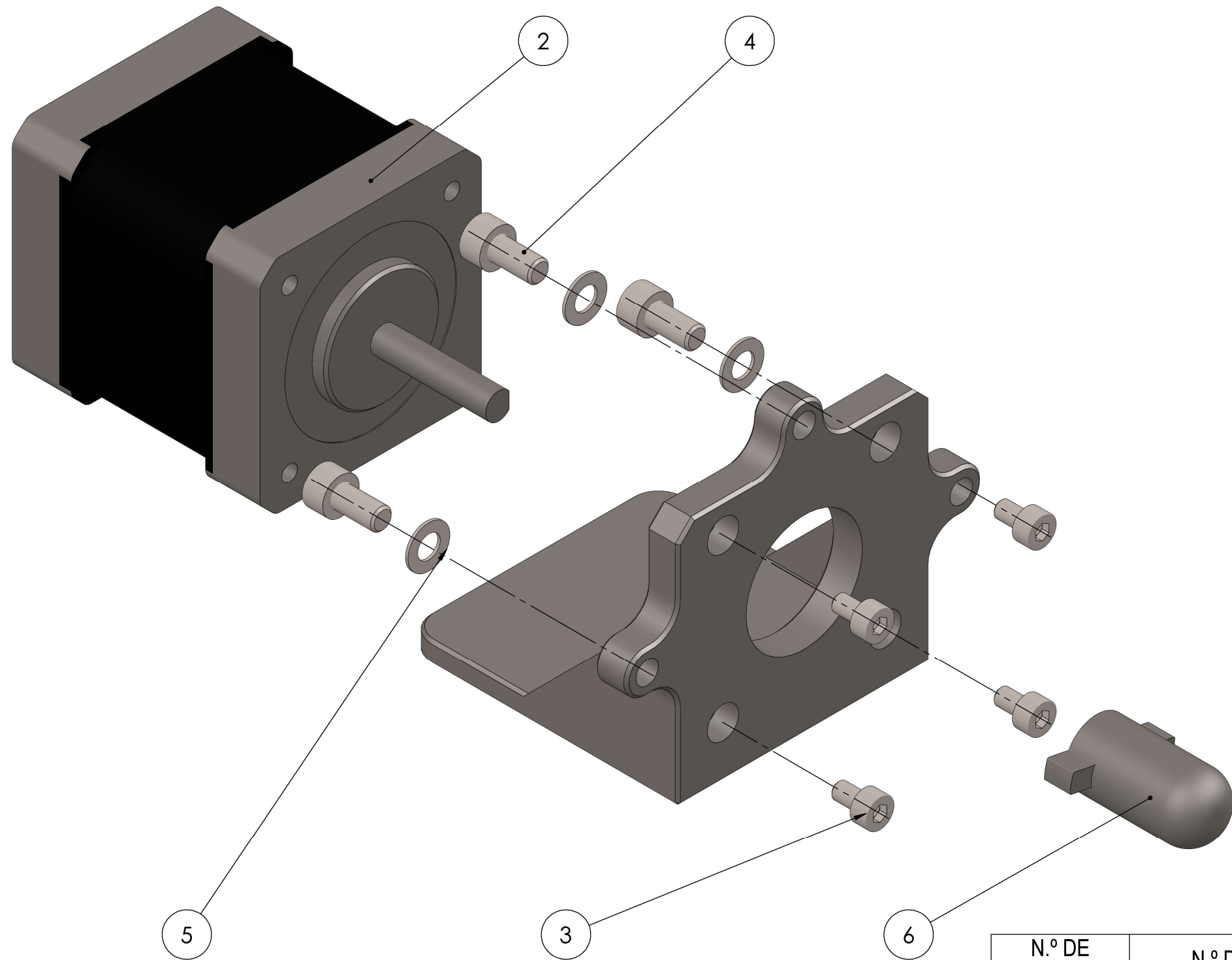
	FECHA	PROYECTO	Diseño y prototipado de una caja de cambios	ESPECIFICACIONES GENERALES	
DIBUJADO	20/10/2020			MATAR ARISTAS 0.5X45º	
APROBADO				DENOMINACIÓN	UNIDADES
				Ensamblaje carcasa	mm
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL	PLA	NOMBRE	
E.T.S.I.I.T		PESO (Kg)	0.3		
upna		PLANO Nº	IBT-01-04-00		ESCALA
				A3	1:1.5



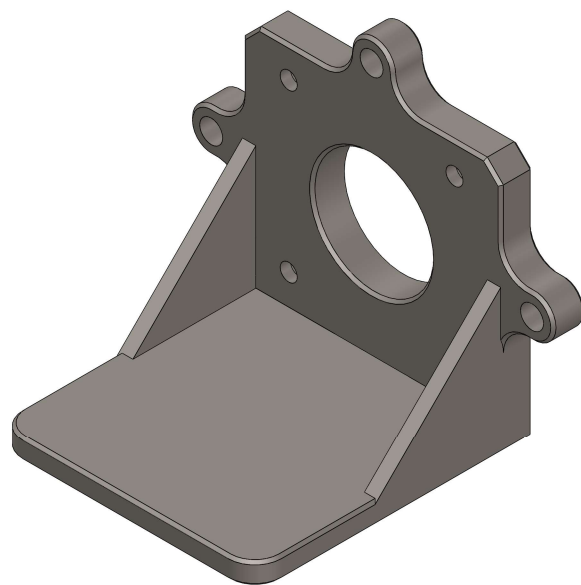
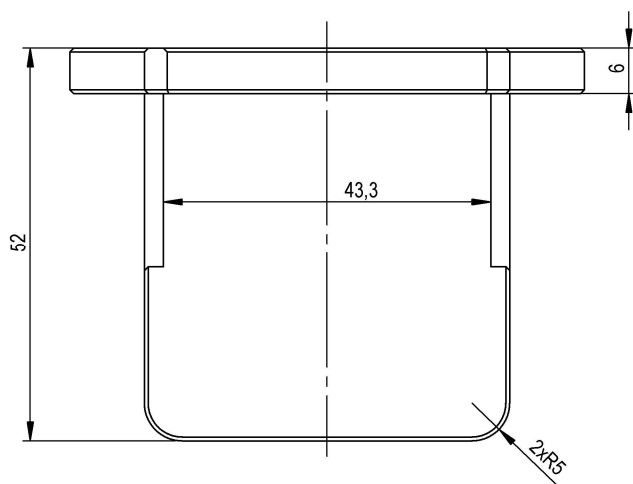
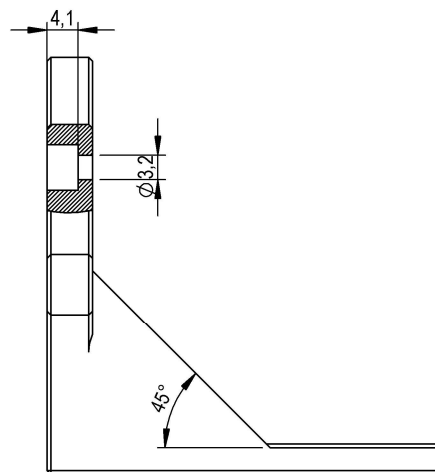
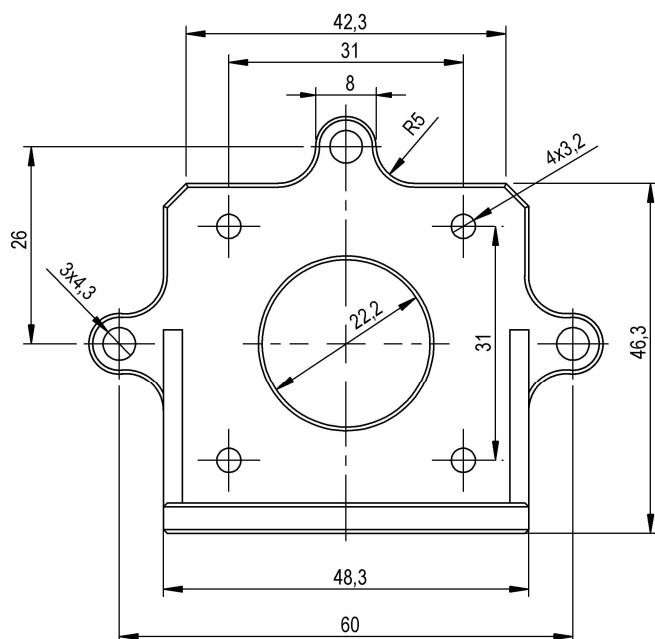
	FECHA	PROYECTO	ESPECIFICACIONES GENERALES		
DIBUJADO	20/10/2020	Diseño y prototipado de una caja de cambios	MATAR ARISTAS 0.5X45º		
APROBADO			DENOMINACIÓN 1ª Parte carcasa	UNIDADES mm	
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL PLA	NOMBRE ÍÑIGO BLANCO TONI		
E.T.S.I.I.T		PESO (g) 91			
up ^{na}		PLANO Nº		A4	ESCALA 1:2
		IBT-01-04-01			

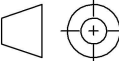


	FECHA	PROYECTO	ESPECIFICACIONES GENERALES		
DIBUJADO	20/10/2020	Diseño y prototipado de una caja de cambios	MATAR ARISTAS 0.5X45°		
APROBADO		DENOMINACIÓN 2ª mitad carcasa	UNIDADES mm		
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL PLA	NOMBRE ÍÑIGO BLANCO TONI		
E.T.S.I.I.T		PESO (g) 125			
up ^{na}		PLANO Nº IBT-01-04-02		A4	ESCALA 1:2



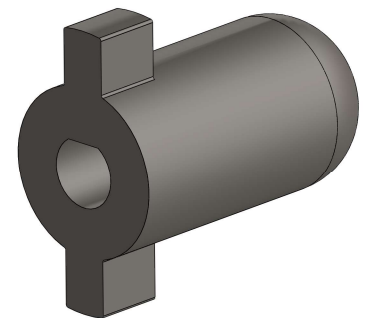
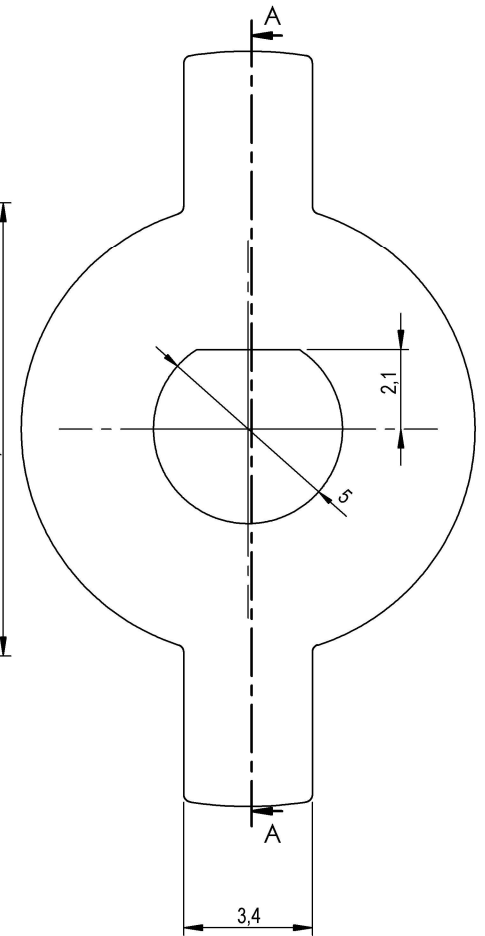
N.º DE ELEMENTO		N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1		IBT-01-05-01	Soporte motor	1
2		Nema 17	Motor paso a paso unipolar	1
3		ISO 4762 M3 x 5 - 5N	Tornillo cabeza hueca hexagonal M3x5 mm	4
4		ISO 4762 M4 x 8 - 8N	Tornillo cabeza hueca hexagonal M4x8 mm	3
5		Washer ISO 7092 - 4	Arandela fina Di= 4 mm	3
6		IBT-01-05-02	Acoplamiento eje motor/primario	1
		FECHA	PROYECTO	ESPECIFICACIONES GENERALES
DIBUJADO		20/10/2020	Diseño y prototipado de una caja de cambios	MATAR ARISTAS
APROBADO				0.5X45°
			DENOMINACIÓN	UNIDADES
			Ensamblaje motor	mm
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL	Acero endurecido, PLA	NOMBRE
E.T.S.I.I.T		PESO (Kg)		
			0.3	
		PLANO N°	IBT-01-05-00	ÍÑIGO BLANCO TONI
upna				
				ESCALA
				1.5:1




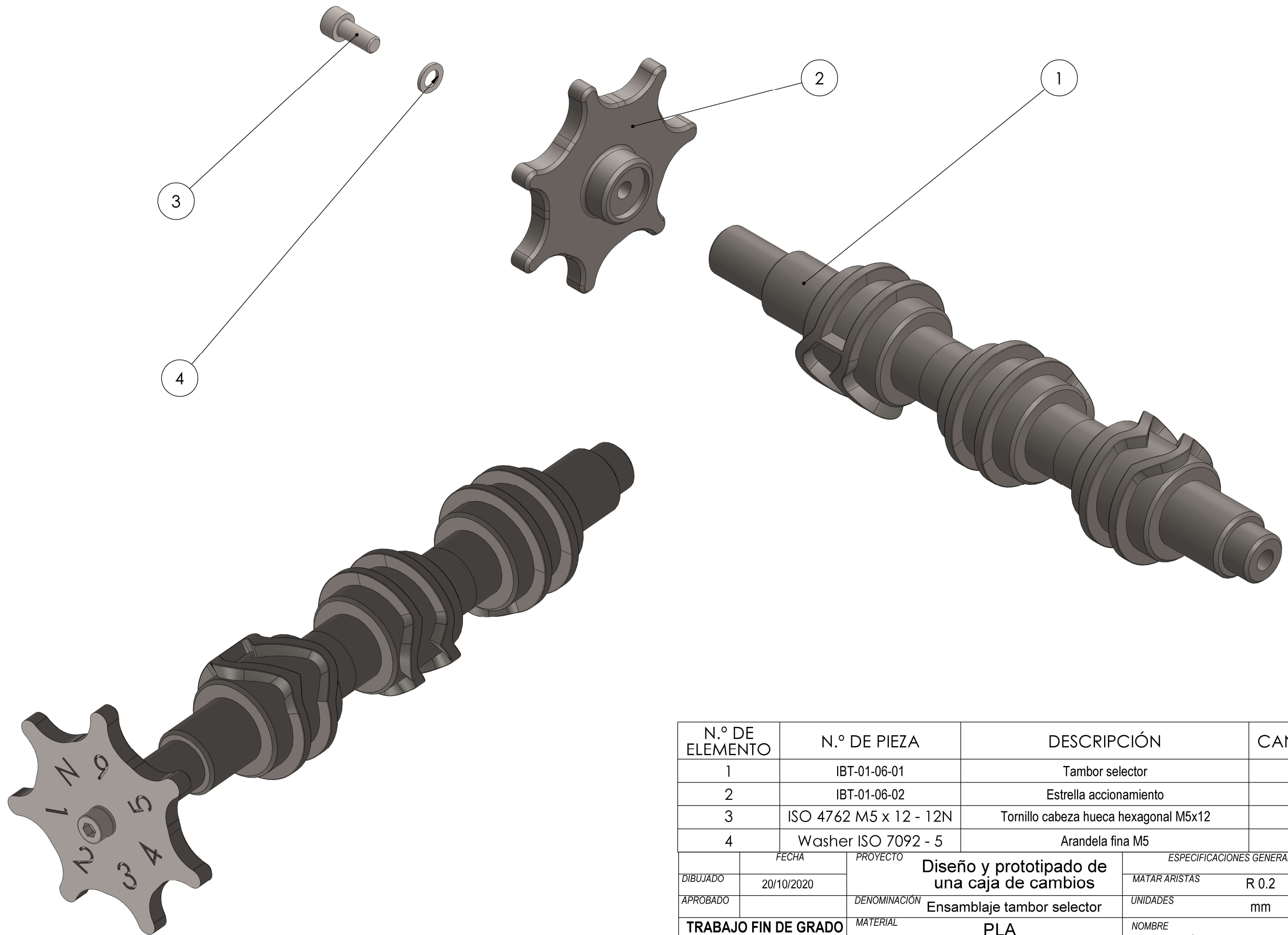
	FECHA	PROYECTO Diseño y prototipado de una caja de cambios	ESPECIFICACIONES GENERALES			
DIBUJADO	20/10/2020		MATAR ARISTAS	0.5X45°		
APROBADO		DENOMINACIÓN Soporte motor	UNIDADES	mm		
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL PLA	NOMBRE ÍÑIGO BLANCO TONI			
E.T.S.I.I.T		PESO (g) 21				
up ^{na}		PLANO Nº IBT-01-05-01		A4	ESCALA	1:1

Technical drawing of a mechanical part, likely a cross-section of a shaft or a similar component. The drawing shows a profile with a central hole and a semi-circular end. Dimensions are provided in millimeters (mm).

- Overall width: 23 mm
- Overall height: $\varnothing 20$ mm
- Radius of the semi-circular end: $\varnothing 12$ mm
- Distance from the left edge to the start of the semi-circular end: 4,95 mm
- Radius of the semi-circular end: 2 mm



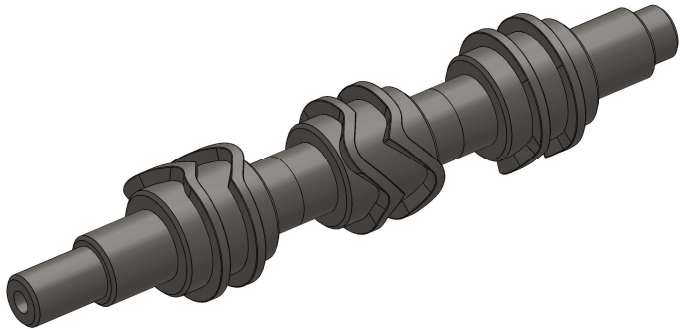
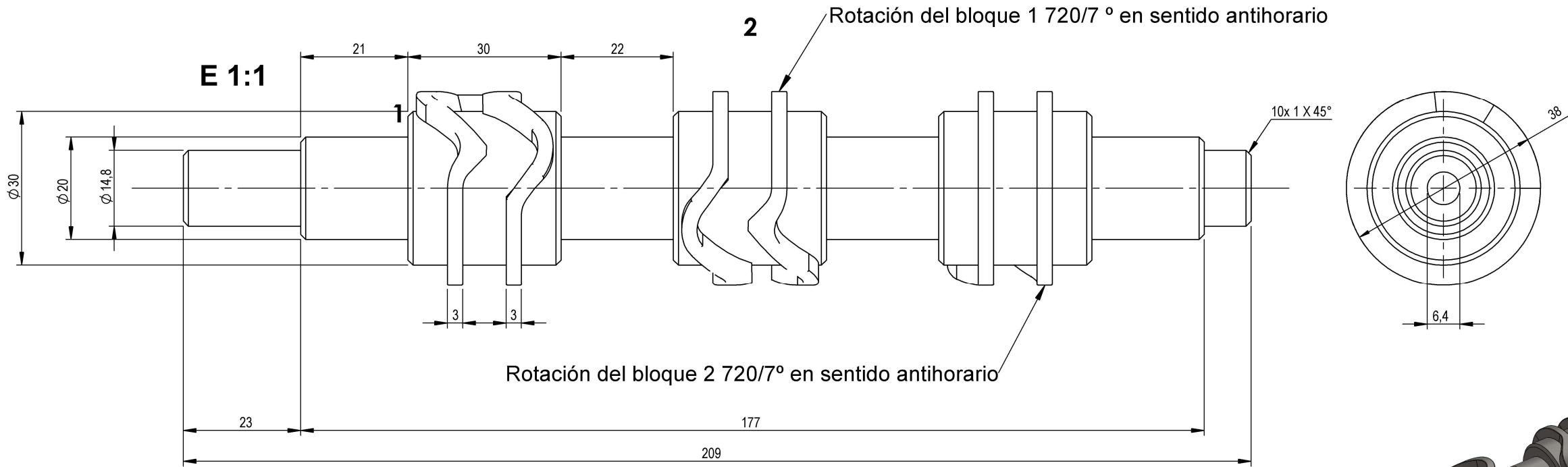
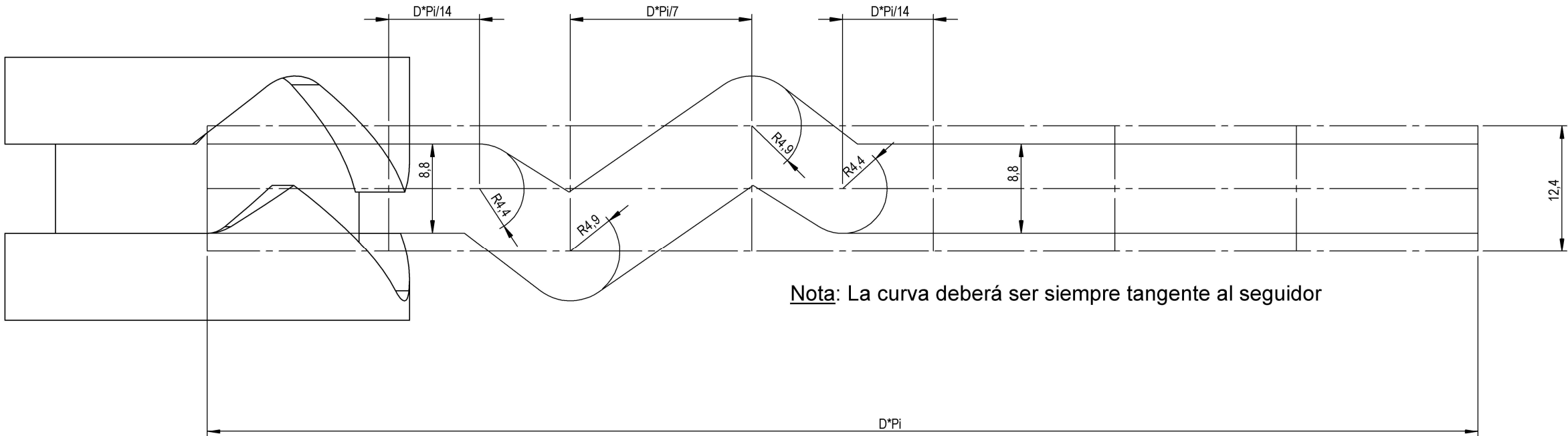
	FECHA	PROYECTO	ESPECIFICACIONES GENERALES		
DIBUJADO	20/10/2020	Diseño y prototipado de una caja de cambios Acoplamiento motor	MATAR ARISTAS		R 0.2
APROBADO			UNIDADES		mm
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL	NOMBRE		
E.T.S.I.I.T		PLA	ÍÑIGO BLANCO TONI		
		PESO (g)			
		3			
up ^{na}		PLANO Nº	IBT-01-05-02		
				A4	ESCALA
					5:1



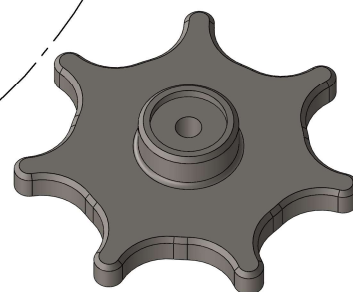
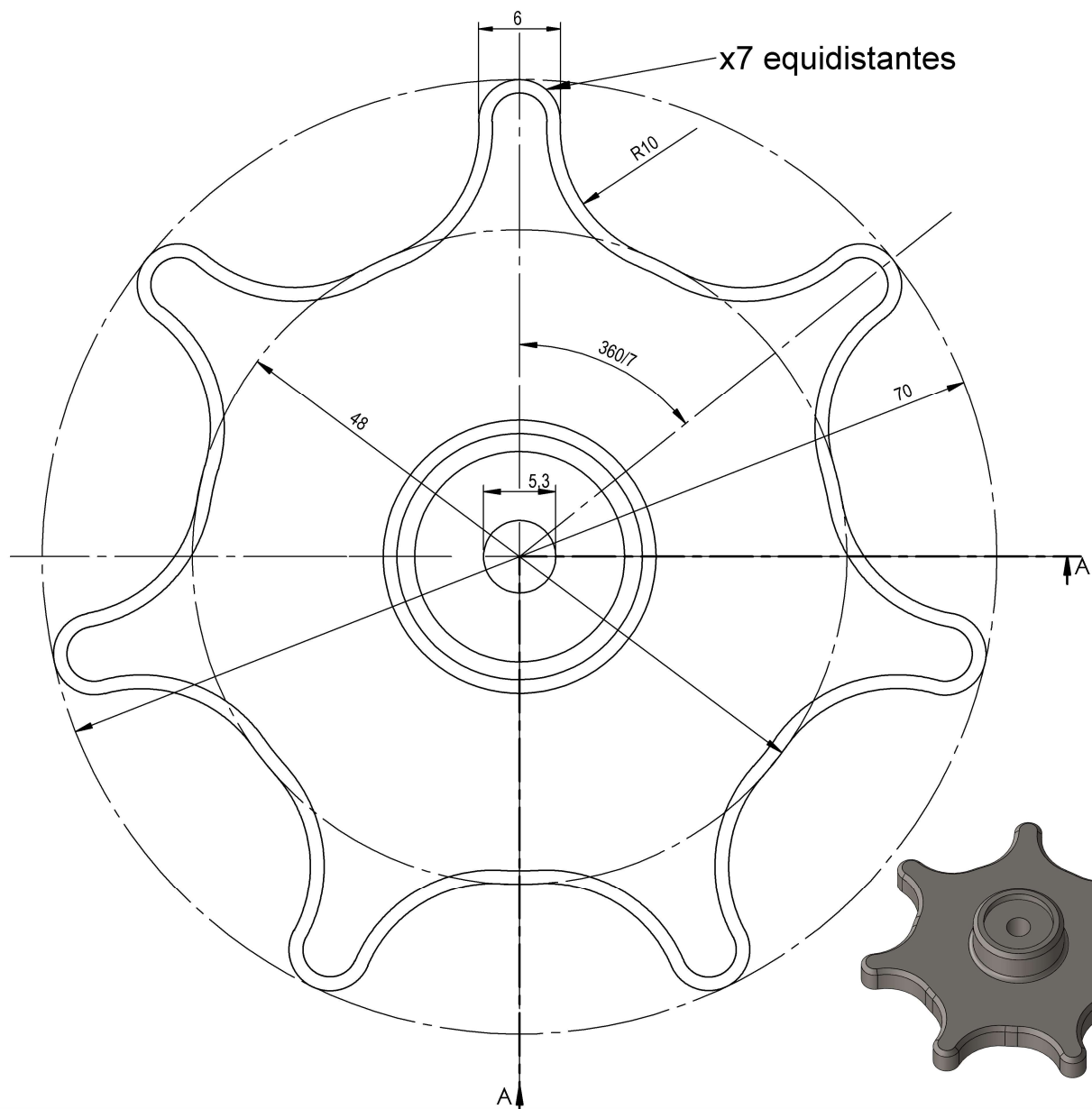
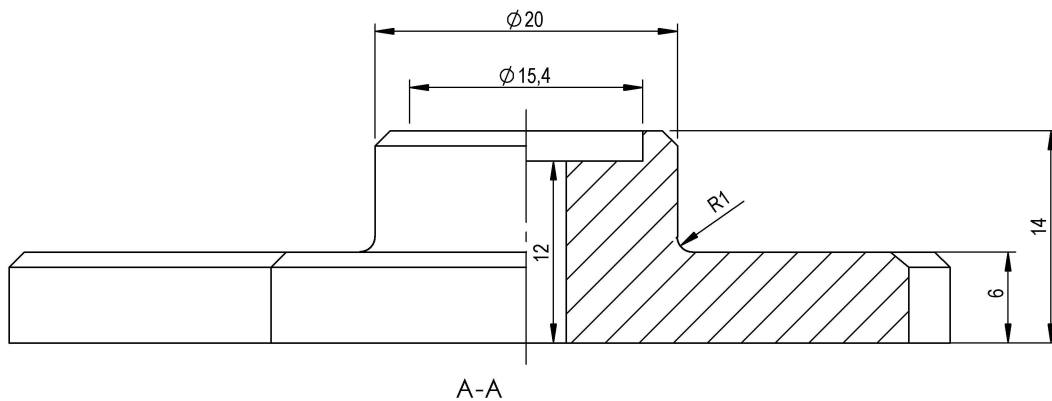
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	IBT-01-06-01	Tambor selector	1
2	IBT-01-06-02	Estrella accionamiento	1
3	ISO 4762 M5 x 12 - 12N	Tornillo cabeza hueca hexagonal M5x12	1
4	Washer ISO 7092 - 5	Arandela fina M5	1



FECHA		PROYECTO	ESPECIFICACIONES GENERALES	
DIBUJADO	20/10/2020		MATAR ARISTAS	R 0.2
APROBADO		DENOMINACIÓN	UNIDADES	
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL	NOMBRE	
E.T.S.I.I.T		PESO (g)	ÍÑIGO BLANCO TONI	
upna		PLANO Nº	ESCALA	
		IBT-01-06-00	A3	1:1

Curva de guiado del seguidor:

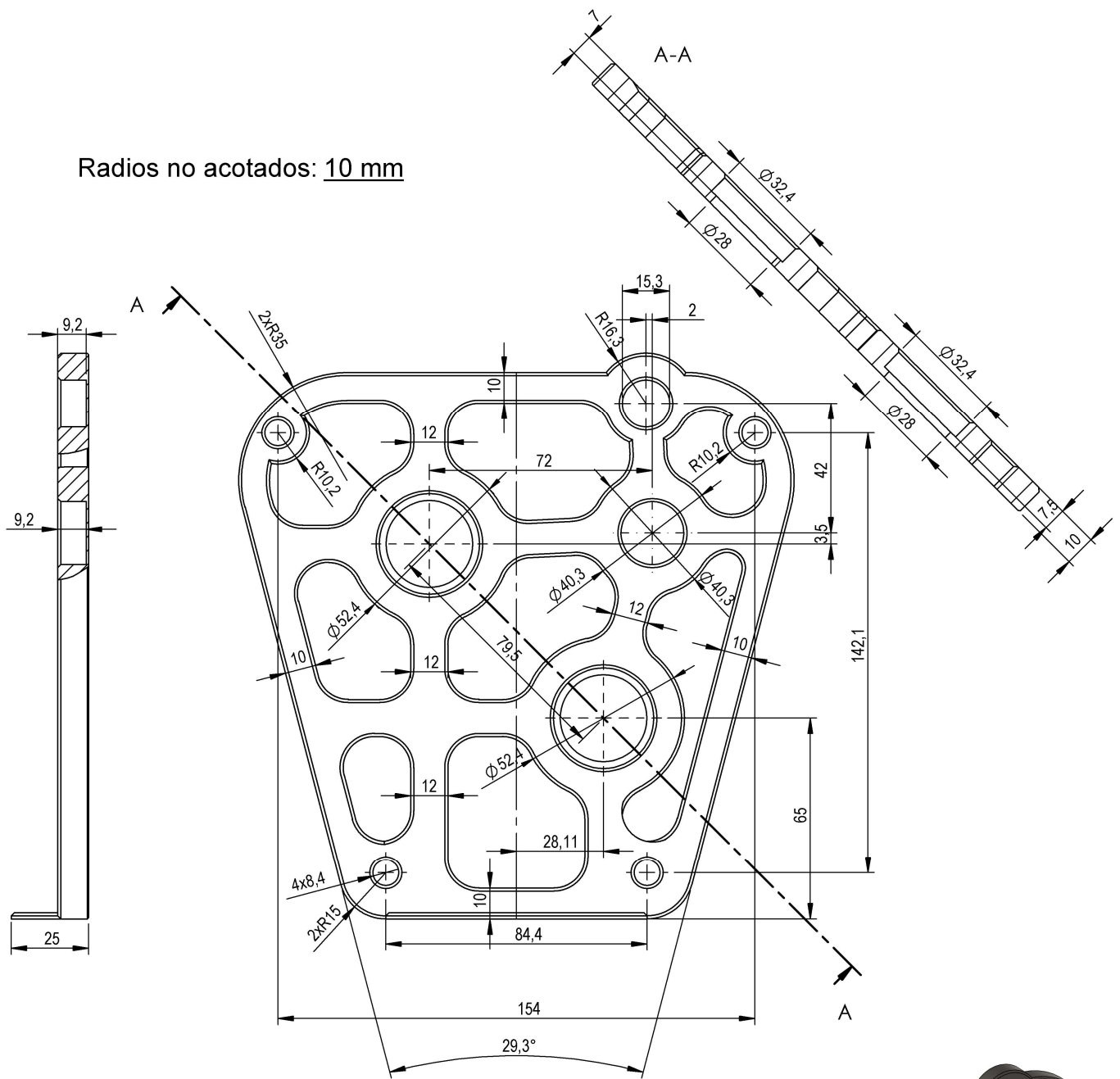


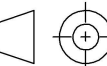
		FECHA	PROYECTO	ESPECIFICACIONES GENERALES	
DIBUJADO	20/10/2020		Diseño y prototipado de una caja de cambios	MATAR ARISTAS	R 0.2
APROBADO				UNIDADES	mm
TRABAJO FIN DE GRADO			DENOMINACIÓN	Tambor selector	
E.T.S.I.I.T			MATERIAL	PLA	
			PESO (Kg)	76	
			PLANO Nº	IBT-01-06-01	
				NOMBRE	ÍÑIGO BLANCO TONI
				ESCALA	2:1



		FECHA	PROYECTO	ESPECIFICACIONES GENERALES	
DIBUJADO	20/10/2020	DENOMINACIÓN	Diseño y prototipado de una caja de cambios	MATAR ARISTAS	1X45°
APROBADO				UNIDADES	mm
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL	PLA	NOMBRE	
E.T.S.I.I.T		PESO (g)	11		
up ^{na}		PLANO Nº	IBT-01-06-02	  A4 ESCALA 2:1	

Radios no acotados: 10 mm



	FECHA	PROYECTO Diseño y prototipado de una caja de cambios	ESPECIFICACIONES GENERALES		
DIBUJADO	20/10/2020		MATAR ARISTAS	0.5X45°	
APROBADO		DENOMINACIÓN Soporte salida	UNIDADES	mm	
TRABAJO FIN DE GRADO		MATERIAL PLA	NOMBRE ÍÑIGO BLANCO TONI		
E.T.S.I.I.T		PESO (g) 91			
up ^{na}		PLANO N° IBT-01-00-01		A4	ESCALA 1:2

3. FICHAS TÉCNICAS

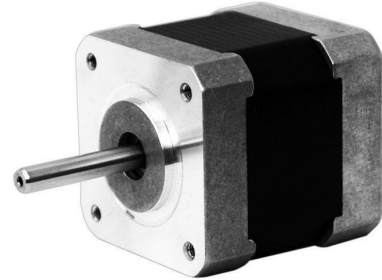
Ficha 1: Motor Nema 17

Ficha 2: EasyDriver Schematic

Ficha 3: Impresora Creality Ender 3

1.8° 42MM High Torque Hybrid Stepping Motor

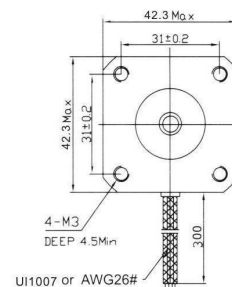
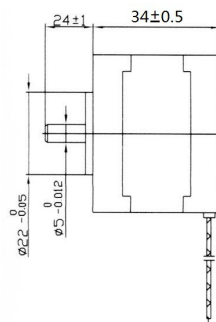
Item	Specifications
Step Angle	1.8°
Step Angle Accuracy	±5% (full step, no load)
Resistance Accuracy	±10%
Inductance Accuracy	±20%
Temperatru Rise	80°CMax. (rated current,2 phase on)
Ambient Temperatuar	-20°C~+50°C
Insulation Resistance	100M?Min.,500VDC
Dielectric Strength	500VAC/ for one minute
Shaft Radial Play	0.02Max. (450 g-load)
Shaft Axial Play	0.08Max. (450 g-load)
Max. radial force	28N (20mm foom the flange)
Max.axial force	10N



● 42MM Hybrid Stepping Motor Specifications

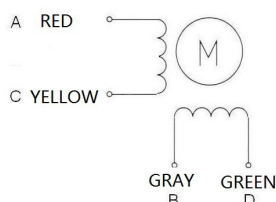
Model No	Rated Voltage	Current /Phase	Resistance /Phase	Inductance /Phase	Holding Torque	# of Leads	Rotor Inertia	Weinght	Detent Torque	Length
XY42STH34-0354A	V	A	Ω	mH	Kg-cm		g-cm ²	kg	g-cm	mm
	12	0.35	34	33	1.6	4	35	0.22	120	34

● Dimension

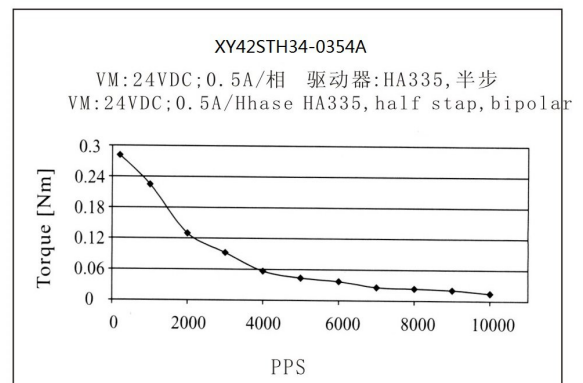


● Wiring Diagram

4 LEADS

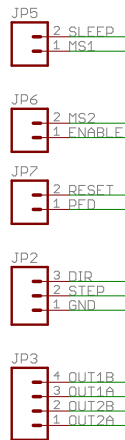


● Pull out Torque Curve

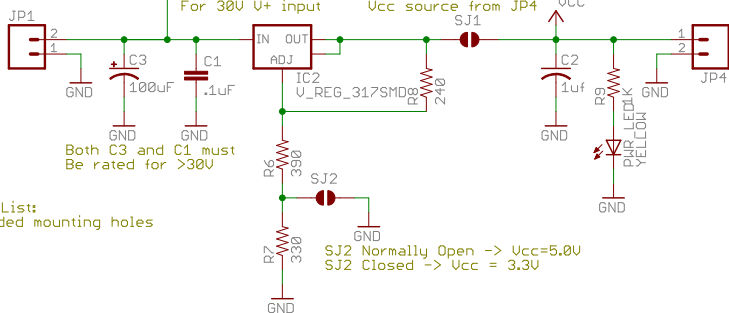


An easy to use bipolar stepper motor driver
Use 4 wire, 6 wire or 8 wire stepper motors
From about 150mA/phase to about 750mA/phase
Defaults to 5V for Vcc (logic supply), settable to 3.3V
Supply 8V to 30V Dc power input on JP1
Do not connect or disconnect motor
while EasyDriver is powered

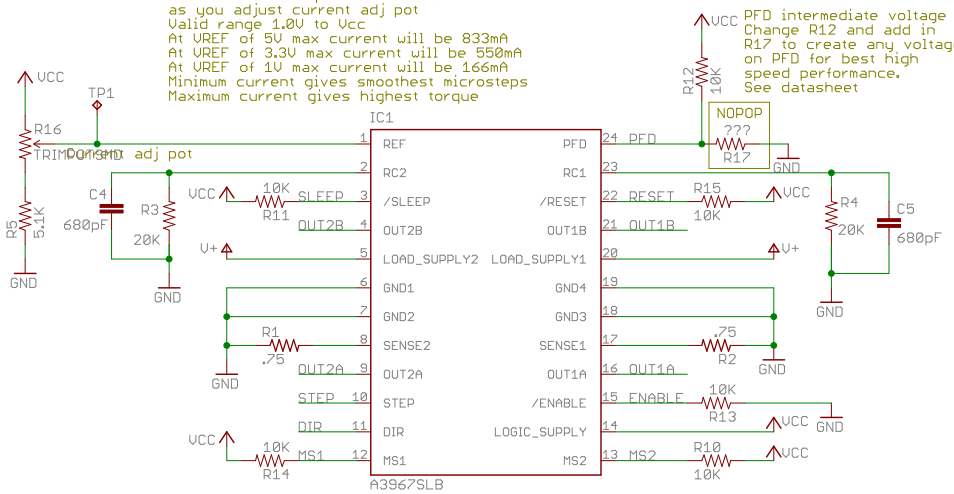
Coil 1 of motor across
OUT1B and OUT1A
Coil 2 of motor across
OUT2B and OUT2A



SJ1 Normally Shorted
Cut to use your own
Vcc source from JP4



PFD intermediate voltage
Change R12 and add in
R17 to create any voltage
on PFD for best high
speed performance.
See datasheet



EasyDriver v4.3 by Brian Schmalz is
licensed under a Creative Commons
Attribution 3.0 US License

Designed by Brian Schmalz		EasyDriver v43	
Produce by Spark Fun Electronics			
TITLE: EasyDriver_v43			SFE
Document Number:			REV:
Date: 3/18/2010 10:41:40 AM		Sheet: 1/1	

CREALITY

Junior 3D printer

Ender-3 Pro



Quick reply within 2 hours



One-on-one service



1 year warranty



Lifelong remote assistance

Which function we have?



Enhance printing stability



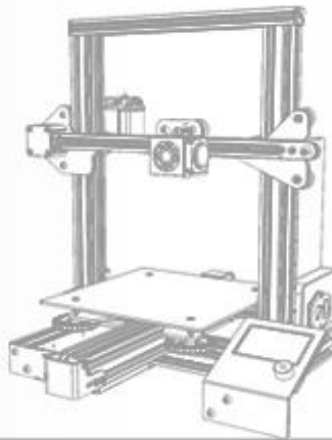
Newly Soft magnetic sticker



MeanWell Power supply



DIY assembly



Heating up with only
5 minutes



Print with high precision



Easier to level



Resume printing
while power-off

Overall parameter list

Model	Ender-3 Pro
Printing Method	FDM (Fused Deposition Molding)
Printing Size	220*220*250mm
Printing Speed	±0.1mm
Nozzle Diameter	Standard0.4mm,can be in 0.2,0.3mm
Bed Temp.	≤110℃
Working Mode	Online or SD card offline
File Format	STL,obj,amf
Slice Software	Cura, Repetier-Host ,Simplify3D
Power Supply	Input:AC 100-120V/6.8A 200-240V/3.4A 50/60Hz Output:DC 24V 270W
Filament	1.75mm PLA,ABS,Wood,TPU,gradient color,carbon fiber,etc.
N.W.	6.9kg
Machine Size	440*440*465mm
G.W.	8.9kg
Package Size	595*495*165mm